

Kode>Nama Rumpun Ilmu : 421/Teknik Sipil

**LAPORAN AKHIR  
PENELITIAN DISERTASI DOKTOR**



**KAPASITAS GESER *INTERFACE* ANTARA BETON RINGAN BERSERAT  
SEBAGAI *STAY-IN PLACE FORMWORK* DENGAN *SELF-COMPACTING  
CONCRETE TOPPING* UNTUK KONSTRUKSI  
PELAT LANTAI KOMPOSIT**

**SLAMET WIDODO, S.T., M.T.  
NIDN: 0003117603**

**UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA  
November 2013**

**Dibiayai oleh:  
DIPA UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA  
Sesuai dengan Surat Perjanjian Penugasan dalam rangka Pelaksanaan Program  
Penelitian Disertasi Doktor Tahun Anggaran 2013  
Nomor: 532a/BOPTN/UN34.21/2013, Tanggal 27 Mei 2013**

HALAMAN PENGESAHAN

**Judul Kegiatan** : KAPASITAS GESER INTERFACE ANTARA BETON RINGAN BERSERAT SEBAGAI STAY IN PLACE FORMWORK DENGAN SELF-COMPACTING CONCRETE TOPPING UNTUK KONSTRUKSI PELAT LANTAI KOMPOSIT

**Peneliti / Pelaksana**

Nama Lengkap : SLAMET WIDODO MT

NIDN : 0003117603

Jabatan Fungsional :

Program Studi : Pendidikan Teknik Bangunan

Nomor HP : 081567966990

Surel (e-mail) : swidodo@live.com

**Institusi Mitra (jika ada)**

Nama Institusi Mitra :

Alamat :

Penanggung Jawab :

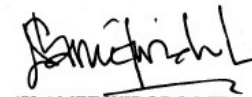
**Tahun Pelaksanaan** : Tahun ke 1 dari rencana 1 tahun

**Biaya Tahun Berjalan** : Rp. 30.000.000,00


**Biaya Keseluruhan** : Rp. 0,00

  
FAKULTAS TEKNIK UNY  
(DR. MOCH. BRURI TRIYONO)  
NIP/NIK 195602161986031003

YOGYAKARTA, 27 - 11 - 2013,  
Ketua Peneliti,

  
(SLAMET WIDODO MT)  
NIP/NIK197611032000031001

Menyetujui,  
KETUA LEMBAGA PENELITIAN

  
(Prof. DR. ANIK GHUFRON)  
NIP/NIK 196211111988031001

## KATA PENGANTAR

Segala Puji bagi Allah pencipta alam semesta yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga Laporan Penelitian Disertasi Doktor yang berjudul Kapasitas Geser *Interface* Antara Beton Ringan Berserat Sebagai *Stay-In Place Formwork* Dengan *Self-Compacting Concrete Topping* Untuk Konstruksi Pelat Lantai Komposit ini dapat diselesaikan.

Laporan ini dapat diselesaikan berkat bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak, untuk itu ucapan terima kasih disampaikan kepada :

1. Bapak Prof. Ir. Iman Satyarno, M.E., Ph.D. selaku promotor yang telah memberikan banyak bimbingan, masukan dan saran dalam penyusunan proposal disertasi,
2. Bapak Dr. Ir. Sri Tadjono, M.S. selaku ko-promotor yang juga telah memberikan banyak bimbingan, masukan serta saran selama proses penyusunan proposal disertasi,
3. Bapak Dr. Techn. Ir. Sholihin As'ad, M.T. yang telah berkenan meluangkan waktu untuk memberikan masukan dalam penyusunan naskah proposal disertasi,
4. Bapak Dr. Eng. Sukamta, S.T., M.T. yang telah berkenan meluangkan waktu untuk memberikan masukan dalam penyusunan naskah proposal disertasi,
5. Bapak Stefanus Adi Kristiawan, S.T., M.Sc., P.hD. yang telah berkenan meluangkan waktu untuk memberikan masukan dalam penyusunan naskah proposal disertasi,
6. Bapak Prof. Dr. Anik Ghufon selaku Ketua Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Universitas Negeri Yogyakarta,
7. Segenap pimpinan beserta staff Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Universitas Negeri Yogyakarta yang telah banyak memberikan bantuan dan fasilitas,

8. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Republik Indonesia yang telah memberikan dukungan berupa dana melalui Penelitian Disertasi Doktor,
9. Pimpinan dan segenap civitas akademika Universitas Negeri Yogyakarta yang telah memberikan kesempatan dan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini,
10. Semua pihak yang telah membantu selama penelitian ini dan tidak dapat disebutkan satu demi satu.

Penyusun menyadari sepenuhnya bahwa kesempurnaan hanyalah milik Allah semata, sehingga laporan penelitian ini juga masih memerlukan saran dan masukan dari para pakar ilmu teknik sipil untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal. Oleh karena itu, penyusun menyampaikan rasa hormat dan penghargaan yang setinggi-tingginya untuk semua diskusi maupun saran yang diberikan dalam penyempurnaan laporan ini.

Yogyakarta, November 2013

Penyusun.

## DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Halaman Pengesahan	ii
Kata Pengantar	iii
Daftar Isi	v
Daftar Tabel	vi
Daftar Gambar	vii
Bab I   Pendahuluan	1
I.1. Latar Belakang Masalah	1
I.2. Identifikasi Masalah	13
I.3. Perumusan Masalah	14
I.4. Maksud dan Tujuan Penelitian	15
I.5. Manfaat Penelitian	16
I.6. Pembatasan Masalah	16
Bab II   Kajian Pustaka	17
II.1. Beton	17
II.2. Beton Ringan	20
II.3. <i>Self-Compacting Concrete</i>	23
II.4. <i>Fiber Reinforced Concrete</i>	28
II.5. <i>Hybrid Fiber Reinforced Concrete</i>	39
II.6. Sistem Konstruksi Beton Multi Lapis ( <i>Multi-Layer Concrete</i> )	44
II.7. Perilaku Kuat Lekat Geser <i>Interface</i> pada Beberapa Material Konstruksi	50
II.8. Efek Komposisi Material Beton Terhadap Kekuatan lekat <i>Interface</i> Beton lama dan Beton Baru	53
II.9. Perkembangan Teori <i>Shear Friction</i>	58
Bab III   Metodologi Penelitian	66
III.1. Metode	66
III.2. Tempat	66
III.3. Tahapan Penelitian	66
III.4. Material	69
III.5. Metode Pengujian dan Analisis Data	69
Bab IV   Hasil dan Pembahasan	76
IV.1. Sifat Fisik dan Mekanik Beton Ringan Agregat Breksi Pumice ( <i>Lightweight Aggregate Concrete</i> )	76
IV.2. Sifat Fisik dan Mekanik Beton Ringan Agregat Breksi Pumice dengan Serat Campuran ( <i>Hybrid fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete</i> )	79
IV.3. Modifikasi Metode Pengujian Kuat lekat <i>Interface</i> Beton Lama dan Beton Baru	87
Bab V   Kesimpulan	103
Daftar Pustaka	
Lampiran	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Sistem Konstruksi <i>Half-Slab</i>	7
Gambar 1.2	Pelaksanaan Konstruksi <i>Half-Slab</i> pada Pembangunan Gedung Menteri Kementerian Pekerjaan Umum (KSO PP-Brantas)	7
Gambar 1.3	Berbagai Sistem <i>Stay in Place Concrete Panel</i>	8
Gambar 1.4	Retak dan Curling pada <i>Multi-layer Concrete</i>	10
Gambar 1.5	Penghematan Waktu dan Tenaga Kerja pada Konstruksi dengan SCC	12
Gambar 2.1	Faktor Reduksi Kuat Tarik Beton Ringan Menurut Berbagai Standar Perencanaan Beton (EuroLightCon, 2000)	19
Gambar 2.2	Hubungan antara Volume Agregat Batu Apung dengan Kuat Tarik Belah Beton Ringan Struktural (Xiaopeng, 2007)	20
Gambar 2.3	Hubungan antara Volume Agregat Batu Apung dengan Kuat Lentur Beton Ringan Struktural (Xiaopeng, 2007)	20
Gambar 2.4	Hasil Uji Kuat Lekat Tulang Beton Ringan dan Beton Normal (Hossain, 2008)	21
Gambar 2.5	Hubungan antara <i>Volume Fraction</i> Pumice Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton (Hossain et al., 2011)	22
Gambar 2.6	Hubungan antara <i>Volume Fraction</i> Pumice Terhadap Modulus Elastisitas Beton (Hossain et al., 2011)	23
Gambar 2.7	Prinsip Dasar Proses Produksi <i>Self-Compacting Concrete</i>	25
Gambar 2.8	Perbedaan Modulus Elastisitas SCC dengan Beton Normal (Domone, 2007)	25
Gambar 2.9	Hubungan Kuat Tekan dengan Modulus Elastisitas SCC (Felokoglu et al., 2007)	26
Gambar 2.10	Hubungan Kuat Tekan dengan <i>Indirect Tensile Strength</i> SCC (Felokoglu et al., 2007)	27
Gambar 2.11	Komparasi Besaran Susut SCC dan Beton Normal pada Berbagai Umur Beton (Loser and Leemann, 2009)	27
Gambar 2.12	(a) Pengaruh Penambahan Serat dan Ukuran Benda Uji Terhadap Kuat Tarik Belah Beton Normal, (b) Beton Ringan (Balendran et al., 2002)	32
Gambar 2.13	(a) Pengaruh Penambahan Serat dan Ukuran Benda Uji Terhadap Kuat Tarik Lentur Beton Normal, (b) Beton Ringan (Balendran et al., 2002)	32

Gambar 2.14	(a) <i>Toughness Index</i> Beton Normal Berserat, (b) Beton Ringan Berserat (Balendran et al., 2002)	32
Gambar 2.15	Pengaruh Jenis Serat dan <i>Volume Fraction</i> Terhadap Panjang Retak akibat Susut Beton (Pelisser et al., 2010)	33
Gambar 2.16	Hubungan Beban dan Lebar Retak (Banthia and Nandakumar, 2003)	34
Gambar 2.17	Hubungan Beban dan Lendutan Balok Beton Bertulang dengan Berbagai Penambahan Serat Baja (Altun et al., 2007)	34
Gambar 2.18	Variasi Gaya Tarik Baja Tulangan dalam Balok Beton Serat Bertulang; (a) Pola Retak Balok, (b) Bentuk Retak, (c) Tegangan pada Lekatan Baja Tulangan dengan Beton, (d) Variasi Gaya Tarik Baja Tulangan (Ozcan et al., 2008)	35
Gambar 2.19	Hubungan Tegangan dan Regangan pada Pengujian Tarik Beton Tanpa Serat (Camps et al., 2008)	36
Gambar 2.20	Hubungan Tegangan dan Regangan pada Pengujian Tarik Beton Berserat Baja sampai Regangan 1 mm/m (Camps et al., 2008)	36
Gambar 2.21	Hubungan Tegangan dan Regangan pada Pengujian Tarik Beton Berserat Baja sampai Regangan 1 mm/m (Camps et al., 2008)	36
Gambar 2.22	Hubungan Beban dan Lendutan pada Pengujian Lentur Beton Berserat Baja (Tsai et al., 2009)	37
Gambar 2.23	Grafik Hubungan <i>Load-Displacement</i> Struktur Slab on Ground dengan Penambahan Serat Baja 30 kg/m <sup>3</sup> dengan Dimensi Serat 30/0.6 dan 50/1.0 (Sorelli et al., 2006)	37
Gambar 2.24	Hubungan Beban <i>Monotonic</i> dan <i>Center Slab Deflection</i> pada Pengujian <i>Plain and Synthetic Fiber-Reinforced Concrete Slabs</i> (Roesler et al., 2006)	38
Gambar 2.25	Hubungan Beban dan Lendutan pada Pengujian Lentur Pelat Dua Arah dengan Berbagai Material Beton (Ellouze et al., 2010)	39
Gambar 2.26	Hubungan antara Tegangan Lentur dan Lendutan Tengah Bentang pada Beton dengan <i>Fly Ash</i> Berserat Campuran Baja dan Polyethylene Ahmed et al., 2007)	41
Gambar 2.27	Hubungan antara Tegangan Lentur dan Lendutan Tengah Bentang pada Beton dengan <i>Fly Ash</i> Berserat Campuran Baja dan Polyvinyl alcohol (Ahmed et al., 2007)	41
Gambar 2.28	Efek Hibridisasi Serat terhadap <i>Flexural Toughness</i> dan <i>Equivalent Flexural Strength</i> Beton (Sivakumar and Santhanam, 2007)	42

Gambar 2.29	Hubungan Beban dan Lendutan pada Pengujian Lentur Beton Normal dan Berserat Campuran (Ostertag and Blunt, 2007)	42
Gambar 2.30	Pola Keruntuhan pada Pengujian Lentur Beton Berserat (Ostertag and Blunt, 2007)	43
Gambar 2.31	Hubungan Beban dan Lendutan pada Pengujian Lentur Beton dengan Berbagai komposisi Serat (Blunt and Ostertag, 2009)	43
Gambar 2.32	Komparasi <i>Load-Deflection Curve</i> antara Balok Beton Bertulang Dua Tahap Pengecoran dengan Nilai Slump Berbeda, Balok Beton Bertulang Sekali Tuang, dan Balok Beton Bertulang Dua Tahap Pengecoran dengan Nilai Slump Sama (Mo and Lai, 1995)	44
Gambar 2.33	Hasil Uji Balok Komposit Ferrocement dan Beton dengan Bentuk <i>Shear Connector</i> yang Berbeda (Nassif and Najm, 2004)	45
Gambar 2.34	Hasil Uji Balok Komposit Ferrocement dan Beton dengan Penambahan <i>Shear Keys</i> (Nassif and Najm, 2004)	45
Gambar 2.35	Komparasi <i>Load-Deflection Curve</i> antara Balok Beton Bertulang Biasa dengan Balok Beton Bertulang Komposit HSC-NC (Lapko et al., 2005)	46
Gambar 2.36	Komparasi <i>Load-Deflection Curve</i> antara Balok Beton Bertulang Biasa dengan Balok Beton Bertulang Komposit UHPFRC-NC (Habel et al., 2007)	46
Gambar 2.37	Hubungan antara Pembebanan dan Perkembangan Retak pada Balok Beton <i>Hybrid Strength Concrete</i> (Kheder et al., 2010)	47
Gambar 2.38	Bentuk dan Ukuran Benda Uji Pelat Lentur Komposit Ferrocement dan Bata Merah (Thanoon et al., 2010)	49
Gambar 2.39	Hasil Uji Pelat Lentur Komposit Ferrocement dan Bata Merah (Thanoon et al., 2010)	49
Gambar 2.40	Hasil Pengujian Perilaku Geser <i>Interface</i> Perkerasan Lentur/ Aspal (Romanoschi and Metcalf, 2002)	51
Gambar 2.41	Hasil Eksperimental untuk Hubungan Kekuatan Geser <i>Interface</i> Dinding bata dan Tekanan Aksial (Lourenco et al., 2004)	52
Gambar 2.42	Hasil Pengujian Pengaruh Gaya Tekan Terhadap Kekuatan Geser <i>Interface</i> Batu Bata (Abdou et al., 2006)	52
Gambar 2.43	Hasil Eksperimental untuk Hubungan Kekuatan Geser <i>Interface</i> Beton dan Tekanan Aksial pada Suhu 25°C (Xu et al., 2009)	53
Gambar 2.44	Efek Penambahan <i>Silica Fume</i> Terhadap Kuat Geser <i>Interface</i> (a) <i>low roughness</i> dan (b) <i>high roughness</i> (Momayez et al., 2004)	54



Gambar 2.45	Efek Penambahan <i>Silica Fume</i> dan Kondisi <i>Substrate</i> Terhadap Kuat Geser <i>Interface</i> (Shin and Wan, 2010)	54
Gambar 2.46	Efek Ca/Si ( <i>Calcium Silicate Hydrate/ Calcium Hydroxide</i> ) Terhadap Kuat Geser <i>Interface</i> (Shin and Wan, 2010)	55
Gambar 2.47	Efek Penambahan Serat Polypropylene Terhadap Regangan <i>Unrestrained Shrinkage</i> (Wongtanakitcharoen and Naaman, 2007)	56
Gambar 2.48	Efek Penambahan Serat Polyvinyl Alcohol Terhadap Regangan <i>Unrestrained Shrinkage</i> (Wongtanakitcharoen and Naaman, 2007)	56
Gambar 2.49	Efek Penambahan Serat Carbon Terhadap Regangan <i>Unrestrained Shrinkage</i> (Wongtanakitcharoen and Naaman, 2007)	57
Gambar 2.50	Hasil Pengujian Eksperimental Pengaruh Faktor Air Semen Terhadap a) <i>Autogenous Shrinkage</i> dan b) <i>Drying Shrinkage</i> Beton tanpa SRA maupun dengan SRA (Saliba et al., 2010)	57
Gambar 2.51	Hasil Pengujian Eksperimental Pengaruh Faktor Air Semen Terhadap <i>Total Shrinkage</i> Beton tanpa SRA maupun dengan SRA (Saliba et al., 2010)	58
Gambar 2.52	Hipotesis Fenomena <i>Shear Friction</i> (Birkeland and Birkeland, 1966)	59
Gambar 2.53	Hubungan Kekuatan Geser <i>Interface</i> Beton dan Tekanan Aksial (Julio et al., 2010)	64
Gambar 3.1	Bagan Alir Penelitian Disertasi	68
Gambar 3.2	Metode Pengujian Kuat Lentur Metode <i>Four Points</i>	75
Gambar 4.1	Hubungan antara <i>Volume Fraction</i> Agregat Kasar dengan Kuat Tekan Beton	77
Gambar 4.2	Hubungan antara <i>Volume Fraction</i> Agregat Kasar dengan Berat Jenis Beton	77
Gambar 4.3	Efek Substitusi Sebagian Semen dengan <i>Silica Fume</i> Terhadap Kuat Tekan Beton	78
Gambar 4.4	Pengaruh Penambahan Serat Terhadap Nilai Slump Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja	79
Gambar 4.5	Pengaruh Penambahan Serat Terhadap <i>Demoulded Density</i> Beton dengan Campuran 0.1% Serat polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja	80
Gambar 4.6	Pengaruh Penambahan Serat Terhadap Kuat Tekan Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja	80
Gambar 4.7	Pengaruh Penambahan Serat Terhadap Nilai	82

	Modulus Elastisitas Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat Polypropylene dan Berbagai Fraksi Volume Serat Baja	
Gambar 4.8	Hubungan Tegangan-Regangan (Stress-Strain) pada Uji Tekan Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat Polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja (a) 0.0% SF, (b) 0.5% SF, (c) 1.0% SF, (d) 1.5% SF dan (e) 2.0% SF	83
Gambar 4.9	Pengaruh Penambahan Serat Terhadap Kuat Tarik Belah Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja	84
Gambar 4.10	Pengaruh Penambahan Serat Terhadap Kuat Tarik Lentur Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat Polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja	85
Gambar 4.11	Hubungan Beban-Lendutan (Load-deflection) pada Uji Lentur Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat Polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja (a) 0.0% SF, (b) 0.5% SF, (c) 1.0% SF, (d) 1.5% SF dan (e) 2.0% SF	86
Gambar 4.12	Skema Kerja Berbagai Teknik Pengujian Kuat Geser Beton Lama dengan Beton Baru	87
Gambar 4.13	Profil Distribusi Tegangan a) Normal Tegak Lurus Bidang Normal (S11) dan b) Tegangan Geser SHRP 2L-Shape Shear Test (Uji Fisik dilakukan Gillum et al., 2001)	89
Gambar 4.14	Profil Distribusi Tegangan a) Normal Tegak Lurus Bidang Normal (S11) dan b) Tegangan Geser Bi-surface Shear Test (Uji Fisik dilakukan Momayez et al., 2005)	89
Gambar 4.15	Profil Distribusi Tegangan a) Normal Tegak Lurus Bidang Normal (S11) dan b) Tegangan Geser Modified Guillotine Test (Uji Fisik dilakukan Beushausen and Alexander, 2008)	90
Gambar 4.16	Profil Distribusi Tegangan a) Normal Tegak Lurus Bidang Normal (S11) dan b) Tegangan Geser Modified FIP Direct Shear Test (Uji Fisik dilakukan Beushausen and Alexander, 2008)	90
Gambar 4.17	Profil Distribusi Tegangan a) Normal Tegak Lurus Bidang Normal (S11) dan b) Tegangan Geser Push Out Test (Uji Fisik dilakukan Qian et al., 2009)	90
Gambar 4.18	Kontur Tegangan Utama pada SHRP Dual L-Shape Test (Model Fisik Uji Eksperimental dilakukan Gillum et al., 2001)	91
Gambar 4.19	Vektor Tegangan Utama pada SHRP Dual L-Shape	92

	Test (Model Fisik Uji Eksperimental dilakukan Gillum, et al., 2001)	
Gambar 4.20	Kontur Tegangan Utama pada Bi-surface Shear Test (Model Fisik Uji Eksperimental dilakukan Momayez et al., 2005)	92
Gambar 4.21	Vektor Tegangan Utama pada Bi-surface Shear Test (Model Fisik Uji Eksperimental dilakukan Momayez et al., 2005)	93
Gambar 4.22	Kontur Tegangan Utama pada Modified Guillotine Test (Model Fisik Uji Eksperimental dilakukan Beushausen and Alexander, 2008)	93
Gambar 4.23	Vektor Tegangan Utama pada Modified Guillotine Test (Model Fisik Uji Eksperimental dilakukan Beushausen and Alexander, 2008)	94
Gambar 4.24	Kontur Tegangan Utama pada Modified FIP Direct Shear Test (Model Fisik Uji Eksperimental dilakukan Beushausen and Alexander, 2008)	94
Gambar 4.25	Vektor Tegangan Utama pada Modified FIP Direct Shear Test (Model Fisik Uji Eksperimental dilakukan Beushausen and Alexander, 2008)	95
Gambar 4.26	Kontur Tegangan Utama Push-Out Test (Model Fisik Uji Eksperimental dilakukan Qian et al., 2009)	95
Gambar 4.27	Vektor Tegangan Utama Push-Out Test (Model Fisik Uji Eksperimental dilakukan Qian et al., 2009)	96
Gambar 4.28	Skema Usulan Pengujian Bi-Surface Shear Test yang telah Disempumakan (Modified Bi-Surface Shear Test)	97
Gambar 4.29	Profil Distribusi Tegangan a) Normal Tegak Lurus Bidang Normal (S11) dan b) Tegangan Geser Modified Bi-surface Shear Test dengan Beban Deformasi Seragam (diusulkan, 2012)	98
Gambar 4.30	Kontur Tegangan Utama pada Modified Bi-surface Shear Test (diusulkan, 2012)	99
Gambar 4.31	Vektor Tegangan Utama pada Modified Bi-surface Shear Test (diusulkan, 2012)	99
Gambar 4.32	Proporsi Besaran Gaya pada Dua Bidang Geser sebagai Fungsi Perbedaan Modulus Elastisitas dalam pengujian Modified Bi-surface Shear Test (diusulkan, 2012)	101
Gambar 4.33	Hubungan <i>Displacement</i> -Reaksi Tumpuan pada Modified Bi-surface Shear Test (Nilai $E_{ov}/E_{subs}$ digunakan 1,275)	101
Gambar 4.34	Profil Distribusi Tegangan dalam Arah Potongan Horisontal a) S11, b) S22, dan c) S12 dalam pengujian Modified Bi-surface Shear Test dengan UTM (diusulkan, 2012)	102

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat berbagai macam serat (Hannant, 1978)	29
Tabel 2.2	Tipikal sifat-sifat berbagai matrik	29
Tabel 2.3	Pengaruh Penambahan Berbagai Kombinasi Serat Terhadap Sifat Mekanik Beton (Yao et al., 2003)	40
Tabel 2.4	Efek Penambahan Serat Carbon Terhadap Kuat Geser <i>Interface</i> (Chen et al., 1995)	55
Tabel 3.1	Matrix Pengujian Kuat Tekan Beton Agregat Breksi Batu Apung	71
Tabel 3.2	Matrix Pengujian Kuat Tekan Beton Agregat Breksi Batu Apung dengan bahan Tambah Silica Fume	71
Tabel 3.3	Matrix Pengujian Kuat Tekan Beton Agregat Breksi Batu Apung dengan bahan Tambah Serat campuran	71
Tabel 3.4	Matrix Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Agregat Breksi Batu Apung dengan bahan Tambah Serat campuran	73
Tabel 3.5	Matrix Pengujian Kuat Lentur Beton Agregat Breksi Batu Apung dengan bahan Tambah Serat campuran	74
Tabel 4.1	Hubungan antara <i>Volume Fraction</i> Agregat Kasar (Breksi Pumice) dengan Berat Jenis dan Kuat Tekan Beton	77 79
Tabel 4.2	Hubungan antara Persentase Substitusi Sebagian Semen dengan Silica Fume Terhadap Berat Jenis dan Kuat Tekan Beton	81
Table 4.3	Pengaruh Penambahan Serat Terhadap Sifat Mekanik Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat Polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja	

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **I.1. Latar Belakang**

Beton bertulang merupakan material yang telah lama digunakan secara luas dalam dunia konstruksi. Material yang menggunakan beton dan baja tulangan ini banyak dimanfaatkan karena sebagian besar bahan-bahan penyusunnya mudah diperoleh sehingga dapat menekan biaya konstruksi yang diperlukan. Penggunaan material beton di Indonesia sangat dominan. Hal ini ditandai dengan tingkat konsumsi semen domestik yang mencapai lebih dari 48 juta ton pada tahun 2011 dengan tingkat pertumbuhan sebesar 17,7% dibandingkan dengan produksi tahun 2010 yang mencapai 40,78 juta ton (<http://www.duniaindustri.com>: Tim Redaksi 03, 2012).

Beton adalah material yang kuat dalam menahan tekan namun lemah dalam menahan tarik. Berdasarkan karakteristik mekanik beton tersebut, maka dalam analisis maupun perencanaan struktur beton bertulang, beton hanya diperhitungkan efektif menahan gaya tekan, tetapi diabaikan kekuatannya dalam menahan gaya tarik. Dalam meninjau kekuatan sisi tarik beton bertulang, beton hanya difungsikan sebagai media penghubung antara beton sebagai penahan tegangan tekan dengan baja tulangan yang menahan tegangan pada sisi tarik. Dengan demikian, kuat lekat baja tulangan dengan beton di sekelilingnya akan memberikan pengaruh yang besar terhadap kekuatan beton bertulang.

Teknologi beton bertulang konvensional yang digunakan saat ini, menggunakan beton dengan kekuatan yang seragam, baik pada bagian yang menerima gaya tekan maupun bagian yang menerima gaya tarik. Dengan mengingat karakteristik mekanik beton dan konsep analisis

kekuatan beton bertulang, maka penggunaan material beton dengan kekuatan yang seragam menjadi tidak efektif. Hal ini disebabkan karena beton yang terletak pada bagian penampang yang menerima beban tarik hanya akan menambah berat sendiri elemen struktur. Di sisi lain, bagian penampang yang menerima gaya tekan juga tidak didukung dengan kekuatan material yang optimal, sehingga dimensi penampang yang digunakan menjadi lebih besar. Selain itu, kebutuhan baja tulangan juga menjadi lebih besar, sehingga jarak antar tulangan menjadi lebih rapat, dan dapat mengakibatkan berkurangnya kuat lekat baja tulangan.

Pada bagian penampang beton bertulang yang menerima gaya tarik, idealnya digunakan beton yang memiliki berat sendiri seminimal mungkin tetapi mampu memberikan kuat lekat pada baja tulangan secara optimal, dan mampu menahan laju retak yang diakibatkan bekerjanya beban layan. Sedangkan pada bagian penampang yang menerima gaya tekan, sebaiknya digunakan beton dengan kekuatan tekan yang cukup, sehingga dimensi struktur dapat diminimalisir.

Keuntungan yang dapat diperoleh dari penggunaan teknologi beton ringan di antaranya adalah berat jenis beton yang lebih kecil sehingga dapat mengurangi berat sendiri elemen struktur yang mengakibatkan kebutuhan dimensi tampang melintang menjadi lebih kecil. Beban mati struktural yang lebih kecil ini juga dapat memberikan keuntungan yang berkaitan dengan berkurangnya kebutuhan dimensi struktur di bawahnya.

Selain itu, untuk wilayah yang memiliki resiko terjadinya bencana gempa bumi juga akan lebih diuntungkan jika sistem struktur yang diaplikasikan memiliki berat total struktur yang lebih kecil. Hal ini dapat dipahami mengingat semakin besar berat struktur akan mengakibatkan semakin besarnya gaya gempa yang bekerja pada bangunan tersebut. Sesuai dengan uraian di atas, dapat diketahui bahwa penggunaan material beton ringan menjanjikan manfaat yang signifikan.

Beton ringan dapat diproduksi dengan menggunakan agregat ringan yang dapat dibedakan menjadi dua golongan yaitu; agregat ringan alami dan buatan. Kriteria agregat ringan struktural telah ditetapkan secara jelas dalam ASTM 330 bahwa bobot isi kering gembur tidak boleh melampaui 880 kg/m<sup>3</sup> dan berat jenis agregat tidak boleh melampaui 2000 kg/m<sup>3</sup>.

Wilayah Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) menyimpan potensi yang sangat besar untuk pengembangan produk berbasis breksi batu apung (*natural pumice breccia*). Menurut Pusat Pembinaan Sumber Daya Investasi (2012), cadangan *pumice* yang tersimpan di DIY tercatat lebih dari 2,5 milyar m<sup>3</sup>, meliputi wilayah Kabupaten Gunung Kidul ± 2,497 milyar m<sup>3</sup>, Kabupaten Bantul ± 76,067 juta m<sup>3</sup> dan Kabupaten Sleman ± 85,367 juta m<sup>3</sup>, dimana masing lokasi terletak relatif saling berdekatan. Hasil uji awal yang telah dilakukan menunjukkan bahwa breksi batu apung yang berada pada formasi batuan Semilir di wilayah DIY memiliki bobot isi kering gembur 760 kg/m<sup>3</sup> dan berat jenis 1,620. Dengan demikian, dapat diketahui bahwa breksi batu apung memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku produksi beton ringan struktural.

Tersedianya *pumice* yang melimpah ini menawarkan berbagai keuntungan yaitu; 1) *pumice* lebih ramah lingkungan (tidak banyak menimbulkan polusi udara berupa gas CO<sub>2</sub> sehingga tidak memicu *global warming*) karena dapat dimanfaatkan tanpa melalui proses pembakaran, tidak seperti agregat ringan buatan yang membutuhkan proses pembakaran, 2) lebih murah karena tersebar luas di wilayah DIY bahkan Indonesia, 3) dapat menyerap tenaga kerja di sekitar lokasi penambangan.

Potensi sumber daya alam ini belum dimanfaatkan oleh pemerintah daerah maupun industri terkait. Oleh karenanya, perlu dilakukan penelitian untuk dapat menghasilkan beton ringan struktural yang memenuhi kriteria ACI Committee 213 (2003), dengan kuat tekan minimal 17 MPa dan berat isi keadaan seimbang antara 1120 sampai 1920 kg/m<sup>3</sup> (*ACI Manual of*

*Concrete Practice*, 2006). SNI 03-2847 2000 mempersyaratkan berat isi beton ringan maksimal  $1900 \text{ kg/m}^3$  dan berat isi agregat ringan dalam kondisi kering dan gembur tidak melampaui  $1100 \text{ kg/m}^3$ .

Beberapa penelitian di negara maju, menunjukkan bahwa pemanfaatan *pumice* sebagai agregat dalam produksi beton ringan terbukti dapat mencapai kuat tekan yang dipersyaratkan untuk keperluan struktural. Xiaopeng (2005), berhasil mengembangkan material beton ringan berbasis *pumice* yang memiliki kuat tekan 18,5 MPa sampai 27,4 MPa dengan berat isi  $1579 \text{ kg/m}^3$  sampai dengan  $1836 \text{ kg/m}^3$ . Penelitian lain yang dilakukan oleh Sin (2007), juga dapat menghasilkan beton ringan dengan kuat tekan 20 MPa hingga 27 MPa.

Kekuatan beton sangat ditentukan oleh kekuatan agregat dan matrix pengikatnya. Dengan demikian, salah satu faktor kunci yang perlu direayasa untuk meningkatkan kinerja beton ringan adalah dengan mengoptimalkan kekuatan matrix pengikat. Pada umumnya, untuk kondisi beton ringan dan beton normal yang memiliki kuat tekan setara, maka beton ringan akan memiliki ketahanan terhadap proses karbonasi yang lebih baik dibandingkan dengan beton normal. Kondisi ini dapat dimengerti karena untuk memperoleh kuat tekan yang sama, biasanya beton ringan membutuhkan faktor air semen yang lebih rendah dan semen yang lebih banyak daripada beton normal (Lo et al., 2008).

Salah satu kelemahan beton ringan adalah kekuatan tariknya yang lebih rendah dari beton normal (EuroLightCon, 2000). Terkait dengan masalah ini, beberapa penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan daktilitas beton ringan dengan cara menambahkan serat. Menurut Balendran et al. (2002), penambahan serat baja jenis *shortcut* mampu meningkatkan kuat tarik belah beton ringan sampai 165% bahkan dapat melampaui peningkatan kuat tarik belah beton normal dengan bahan tambah serat baja yang sama. Penambahan serat baja juga dapat meningkatkan kuat tarik lentur beton ringan sampai dengan 91%. Peningkatan ini juga mampu



melampaui peningkatan kuat tarik lentur beton normal. Keuntungan lain yang diperoleh adalah besarnya dimensi benda uji beton ringan tidak memberikan pengaruh terlalu besar terhadap hasil pengujian. Hal ini berbeda dengan hasil pengujian beton normal, yang menunjukkan perbedaan indeks yang signifikan dengan ukuran benda uji yang lebih besar. Hasil ini mengindikasikan bahwa untuk beton normal, efektifitas penggunaan serat akan berkurang seiring dengan bertambahnya dimensi balok, sedangkan untuk beton ringan efektifitas penambahan serat tidak terlalu sensitif terhadap ukuran balok.

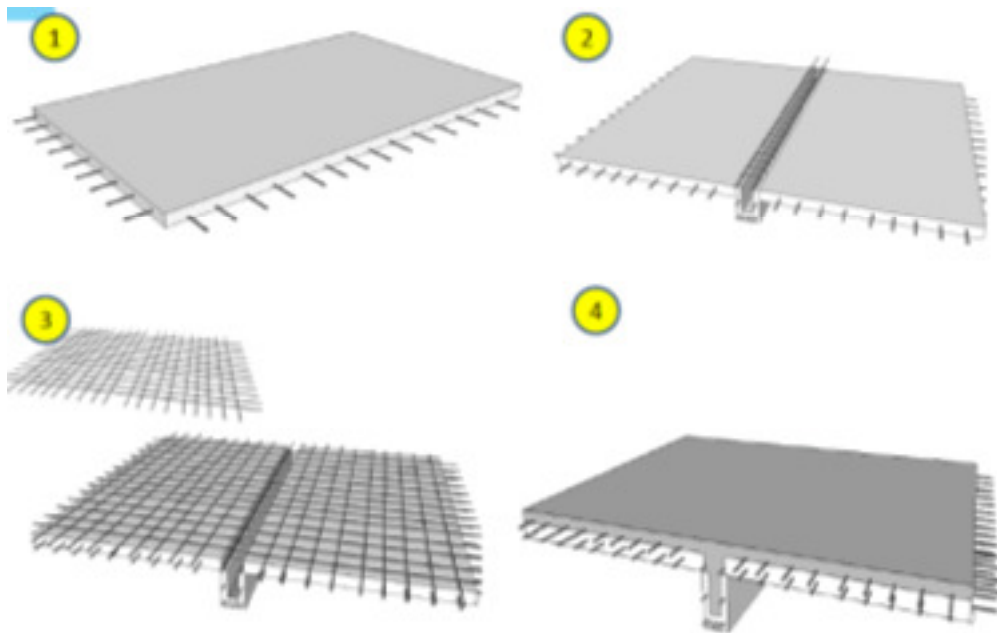
Untuk meningkatkan efektifitas penambahan serat dalam beton, telah dilakukan berbagai penelitian untuk mencampur atau melakukan hibridisasi serat. Hibridisasi ini bertujuan mengoptimalkan potensi masing-masing jenis serat sesuai dengan karakteristik unik yang dimiliki. Hibridisasi dapat dilakukan dengan mencampur beberapa jenis serat dengan panjang, modulus elastisitas, ataupun kuat tarik yang berbeda. Serat yang lebih panjang diharapkan berkontribusi pada perbaikan karakteristik beton sebagai penghambat retak yang berukuran besar (*macrocracks*). Serat yang berukuran lebih pendek diharapkan dapat berkontribusi pada awal terjadinya retak (menghambat laju *microcracks*), serta memperbaiki kekuatan *pull out* fiber menjadi lebih besar. Penambahan serat yang memiliki modulus elastisitas tinggi dapat meningkatkan kekuatan tarik lentur beton secara lebih signifikan, namun kapasitas regangan yang dimiliki kecil. Sebaliknya, pemanfaatan serat dengan modulus elastisitas rendah tidak dapat meningkatkan kuat lentur beton secara signifikan, tetapi dapat meningkatkan kapasitas regangan beton dengan signifikan.

Konsep hibridisasi ini telah dibuktikan mampu meningkatkan kekuatan tarik belah beton hingga 36,5%, meningkatkan kuat tarik lentur hingga 32,9%, dan meningkatkan *toughness index* beton hingga 199,5%, dengan menggabungkan serat baja dan serat karbon, maupun serat baja dan

serat polypropylene (Yao et al., 2003). Campuran *steel fiber* dan serat polypropylene dapat meningkatkan *flexural toughness* melebihi beton yang hanya menggunakan serat baja saja. Hal ini dapat dicapai karena serat polypropylene berfungsi pada saat terjadi retak-retak berukuran kecil, dan serat baja berperan dalam mempertahankan *post-peak behavior* (Sivakumar and Santhanam, 2007).

Dalam berbagai penelitian lain, pengembangan *self-compacting concrete* (SCC) telah dapat meningkatkan kemudahan pelaksanaan konstruksi serta kinerja struktur beton yang dihasilkan. Material beton modern tersebut memiliki karakteristik unik yang belum terungkap secara lengkap, misalnya SCC yang sangat potensial untuk digunakan sebagai lapis *cast in place concrete topping* untuk konstruksi beton semi-pracetak maupun untuk lapis *overlay* pada pekerjaan perbaikan struktur.

Sejalan dengan pesatnya perkembangan teknologi konstruksi beton, saat ini dapat ditemui secara luas aplikasi beton komposit (*composite concrete*), di mana pada penampang beton bertulang terdapat beberapa lapis beton yang berbeda. Aplikasi *composite concrete* antara lain dapat dijumpai pada sistem konstruksi *Partial depth precast concrete*, di mana beton pracetak (*precast*), baik jenis *unreinforced*, *reinforced*, ataupun *prestressed concrete* dimanfaatkan sebagai *stay in place formwork* untuk pengecoran beton insitu (*cast in place*). Teknologi ini dikembangkan dengan tujuan percepatan masa konstruksi, penghematan biaya konstruksi khususnya bekisting (*conventional formwork*), atau bahkan dengan tujuan penghematan baja tulangan (ACI Committee 347). Salah satu contohnya adalah konstruksi *partial-depth precast concrete deck panels*, seperti terlihat pada Gambar 1.1 dan 1.2.



Sumber: KSO PP-Brantas, 2011

Gambar 1.1 Sistem Konstruksi *Half-Slab*



Sumber: KSO PP-Brantas, 2011

Gambar 1.2 Pelaksanaan Konstruksi *Half-Slab* pada Pembangunan Gedung Menteri Kementerian Pekerjaan Umum (KSO PP-Brantas)

Pada saat ini, berbagai sistem pelat beton semi-pracetak telah dikembangkan dan diproduksi, di antaranya: 1) permukaan pelat pracetak tanpa penghubung geser (produk Adhimix Precast), 2) permukaan bergelombang (produk Beton Elemindo Perkasa), 3) permukaan dengan penghubung geser (produk Mega Prefab), dan 4) *lattice girder slab* (produk Hume Concrete), seperti terlihat pada Gambar 1.3.



Adhimix Precast, 2012



Beton Elemindo Perkasa, 2012



Mega Prefab, 2012



Hume Concrete, 2012

Gambar 1.3 Berbagai Sistem *Stay in Place Concrete Panel*

Pada umumnya, elemen struktur diharapkan dapat bekerja secara monolith. Oleh karena itu, kekuatan lekatan antara dua lapis beton yang

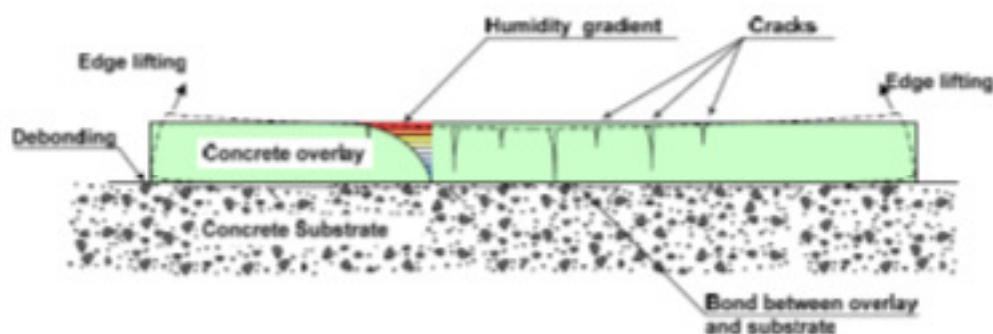
digunakan akan menjadi faktor yang sangat menentukan. Pada konstruksi *composite concrete*, terjadinya retak-retak maupun delaminasi awal pada *interface* harus diminimalisir. Setelah struktur digunakan, komponen gaya yang luar yang dapat menyebabkan terpisahnya dua lapis beton adalah gaya geser dan gaya tarik tegak lurus bidang geser. Dengan demikian, gaya-gaya tersebut harus dapat ditanggulangi (Silfwerbrand, 2003).

Sesuai dengan keperluannya, saat ini dimungkinkan konstruksi *composite concrete* yang mengkombinasikan lapis beton normal dengan beton khusus (misalnya: *high strength concrete*, *lighweight concrete*, *fiber reinforced concrete*, *self-compacting concrete*) untuk mendapatkan kinerja struktural yang lebih optimal. Penggunaan tipe beton yang berbeda dimungkinkan akan memberikan hasil yang berbeda pula terhadap kekuatan lekat antara dua lapis beton. Hal ini terutama dipengaruhi oleh besaran *differential shrinkage* antara dua lapis beton yang digunakan.

Menurut Bakhsh (2010), adhesi *interface* antara dua lapis beton dipengaruhi beberapa hal, di antaranya: 1) kebersihan permukaan *substrate* dari zat-zat kontaminan yang dapat menyebabkan licinnya permukaan beton dan terganggunya lekatan pada *interface*, 2) kekasaran yang sangat ditentukan perlakuan terhadap permukaan *substrate*, 3) komposisi beton segar untuk material *overlay/concrete topping*, 4) teknik pengecoran dan pemadatan *overlay/concrete topping*, 5) perawatan, dan 6) umur beton.

Berbagai penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa *shrinkage* merupakan faktor yang sangat mempengaruhi perilaku *interface* antara dua lapis beton. Menurut Carlsward (2006), munculnya retak maupun delaminasi pada *interface* awalnya dipicu oleh terjadinya perbedaan deformasi antara lapis *substrate* dengan lapis *overlay/concrete topping*. *Shrinkage* yang terjadi pada lapis *overlay/concrete topping* yang baru saja selesai dicor akan mengakibatkan terjadinya tegangan normal pada lapis

*overlay/concrete topping*, sedangkan pada bagian dasarnya terjadi kekangan yang ditimbulkan oleh lapis *substrate*, jika tegangan yang terjadi telah melampaui kekuatan material yang digunakan, maka retak akan mulai terjadi pada lapis *overlay/concrete topping*. Fenomena *restrained shrinkage* ini juga memicu terjadinya tegangan pada daerah ujung bebas yang mengakibatkan lapis *overlay/concrete topping* akan terangkat pada bagian ujungnya (*curling / edge lifting*), seperti terlihat pada Gambar 1.4.



Sumber: Carlsward, 2006

Gambar 1.4 Retak dan *Curling* pada *Multi-layer Concrete*

Li et al. (2001), melaporkan bahwa penggunaan pozolan berupa *fly ash* dapat meningkatkan kekuatan *interface* karena penggunaan *fly ash* sebesar 25% dari berat semen yang dibutuhkan dapat meningkatkan kepadatan *interfacial transition zone*. Hal serupa juga dilaporkan oleh Momayez et al. (2004), yang menyatakan bahwa penambahan 7% *silica fume* dapat meningkatkan kekuatan *interface* sebesar 25%. Chen et al. (1995), menyatakan bahwa penambahan serat karbon tipe *short-cut* sebesar 0.35% (*volume fraction*) pada lapis *overlay/concrete topping* dapat memberikan peningkatan kuat geser *interface* beton lama dengan beton baru hingga sebesar 89%. Peningkatan ini dapat terjadi karena penambahan serat dapat meminimalisir *drying shrinkage* pada lapis *overlay/concrete topping*. Selain komposisi material beton, umur beton juga merupakan hal yang harus dicermati dengan fenomena *drying shrinkage*.

Wongtanakitcharoen and Naaman (2007), menyatakan bahwa besarnya regangan susut akibat proses perkerasan beton sangat tergantung pada umur beton. Hasil penelitian tersebut juga menjelaskan bahwa penambahan *micro fiber* secara signifikan dapat mengurangi besaran regangan susut yang terjadi.

Dengan demikian, dalam konstruksi *composite concrete* perbedaan antara umur *substrate* dan *overlay/concrete topping* dapat diduga akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perilaku *interface*. Hal ini dapat dipahami mengingat semakin besar perbedaan umur kedua lapis beton maka dapat diduga bahwa akan semakin besar pula perbedaan deformasi antara lapis *substrate* dengan lapis *overlay/concrete topping*. Kendatipun demikian, sampai saat ini belum ditemukan hasil penelitian yang mengungkapkan perilaku *interface* antara dua lapis beton dengan mempertimbangkan umur *substrate*.

Berbagai metode pengujian telah dikembangkan untuk memprediksi kekuatan lekat *interface* pada dua lapis beton yang berbeda. Pengujian-pengujian tersebut menitik-beratkan pada pengujian kekuatan geser dan tarik pada *interface* secara terpisah, tetapi belum memperhitungkan bekerjanya gaya normal dalam arah tegak lurus terhadap bidang *interface*.

Metode pengujian kekuatan lekat *interface* juga masih menyisakan banyak masalah (terutama dalam hal uji kuat geser) terkait dengan kemudahan pelaksanaan sampai pada akurasi hasil pengujian. Usulan metode pengujian yang disampaikan Momayez et al. (2005) melalui penelitian disertasinya, jika dikaji secara lebih detail ternyata juga masih menyisakan masalah untuk disempurnakan. Sampai saat ini, metode pengujian dan perhitungan kekuatan batas *interface* dua lapis beton yang berbeda belum diatur secara detail dalam Standar nasional Indonesia. Oleh karena itu, masalah *interface* dua lapis beton yang berbeda perlu dikaji lebih dalam untuk menjawab berbagai permasalahan sebagaimana disampaikan pada uraian-uraian di atas.



Potensi penggunaan *SCC* sebagai material *overlay/concrete topping* pada konstruksi semi-pracetak sangat besar karena kemudahan aplikasinya. *SCC* mampu mengalir dengan lebih baik sehingga menawarkan kemudahan pada konstruksi gedung bertingkat. Selain itu, *SCC* juga mampu mengalir dan memadat dengan memanfaatkan berat sendirinya, dengan demikian jumlah pekerja dan waktu konstruksi yang dibutuhkan juga menjadi lebih hemat. Ilustrasi keunggulan *SCC* dapat dilihat pada Gambar 1.5.



Sumber: Singapore Concrete Institute, 2011

Gambar 1.5 Penghematan Waktu dan Tenaga Kerja pada Konstruksi dengan *SCC*

*SCC* yang diproduksi dengan menggunakan jumlah agregat kasar yang lebih sedikit dan agregat halus yang lebih banyak serta jumlah *binder* yang lebih banyak pula. Komposisi ini akan mempengaruhi susut beton, kekuatan adhesi lapis beton, maupun kekuatan *interlock* pada *interface* beton yang tentunya akan memberikan pengaruh terhadap kapasitas geser *interface* beton. Sampai saat ini, perkembangan material beton



tersebut belum sepenuhnya diakomodir dalam berbagai peraturan perencanaan beton yang telah ada. Oleh karena itu, diperlukan penelitian secara mendalam untuk memberikan masukan agar dapat menyempurnakan peraturan-peraturan perencanaan yang telah ada.

## **I.2. Identifikasi Masalah**

Sesuai dengan uraian dalam latar belakang penelitian dan kajian pustaka yang telah dilakukan, maka dapat diidentifikasi kelemahan pada penelitian-penelitian terdahulu, di antaranya:

1. Teknologi beton ringan perlu dioptimalkan pemanfaatannya untuk memenuhi kebutuhan material konstruksi yang bersifat ramah lingkungan dan berkelanjutan.
2. Komposisi campuran adukan beton ringan beragregat breksi batu apung perlu dioptimalkan untuk mencapai kriteria beton ringan struktural.
3. Komposisi penambahan serat yang optimal pada campuran adukan beton ringan dengan agregat breksi batu apung perlu diketahui untuk meningkatkan kuat tarik beton ringan.
4. Metode pengujian untuk menentukan kekuatan lekat geser *interface* dua lapis beton masih memerlukan penyempurnaan untuk mendapatkan metode yang mudah dan akurat untuk diaplikasikan.
5. Kriteria batas kekuatan *interface* perlu diinvestigasi secara detail dengan mempertimbangkan bekerjanya gaya normal yang bekerja dalam arah tegak lurus bidang *interface*.
6. *Multi-layer concrete system* dapat diaplikasikan untuk konstruksi baru (*sandwich system*, *stay in place concrete panel/preslab/half-slab*) maupun perbaikan struktur (*overlay*), namun hingga saat ini belum ditemukan penelitian yang mengkaji efek umur lapis *substrate* (*substrate maturity*) terhadap perilaku *interface* antara dua lapis beton yang berbeda. Dengan demikian, perlu dilakukan investigasi kekuatan *interface* dua lapis beton dengan

memperhatikan umur *substrate*. Hal ini akan sangat bermanfaat terkait dengan berbagai elemen struktur pracetak yang diproduksi dengan konsep *sandwich system*, ataupun elemen struktur yang sengaja direncanakan sebagai *composite concrete*.

7. Perlu dilakukan investigasi kekuatan lekat geser *interface* dua lapis beton dengan memperhatikan komposisi material *overlay/concrete topping* terkait besaran susut dan kemudahan pemadatan beton segar.
8. Penggunaan material beton modern seperti *self-compacting concrete* maupun *fiber reinforced concrete* sebagai *topping layer* perlu dikaji lebih lanjut.
9. Perlu dikembangkan kriteria kekuatan batas untuk analisis kekuatan *interface* antara dua lapis beton dengan maupun tanpa digunakannya penghubung geser (*shear connector*).

### **I.3. Perumusan Masalah**

Sesuai dengan latar belakang penelitian, maka permasalahan yang terkait dengan balok beton bertulang komposit dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Bagaimana komposisi optimum campuran adukan beton ringan agregat breksi batu apung yang memenuhi syarat sebagai beton ringan struktural?
2. Bagaimana komposisi optimum campuran adukan beton ringan agregat breksi batu apung dengan bahan tambah silica fume berdasarkan hasil uji kuat tekan?
3. Bagaimana komposisi optimum campuran adukan beton ringan agregat breksi batu apung dengan bahan tambah serat campuran berdasarkan hasil uji kuat lentur dan kuat tarik belah?
4. Bagaimana pengujian kekuatan geser *interface* beton yang disumbangkan oleh adhesi beton?

#### **I.4. Maksud dan Tujuan Penelitian**

Penelitian ini dimaksudkan untuk menginvestigasi perilaku lentur dan kekuatan *interface* pelat lantai komposit guna memperoleh teknologi konstruksi beton yang optimal dengan mendayagunakan material beton khusus. Bagian penampang yang menerima gaya tarik dikonstruksikan dengan *Hybrid Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete* sebagai *stay in place formwork* untuk meningkatkan kekuatan tarik beton, meminimalisir kebutuhan tulangan sekaligus mengurangi berat sendiri struktur, dan *self compacting concrete* sebagai lapis *topping* untuk mempermudah dan mempercepat konstruksi.

Secara rinci, tujuan yang hendak dicapai melalui penelitian disertasi ini adalah sebagai berikut:

1. Menghasilkan beton ringan struktural yang memiliki berat satuan kurang dari  $1900 \text{ kg/m}^3$  (SNI 03-2847 2000) dan kuat tekan minimal 17 MPa (ACI-213, 2003) dengan kekuatan tarik yang lebih baik.
2. Menentukan metode pengujian untuk mengukur besaran kuat geser *interface* beton yang disumbangkan oleh adhesi dua lapis beton yang berbeda.

#### **I.5. Manfaat Penelitian**

Manfaat yang dapat diperoleh melalui pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengoptimalkan kinerja beton ringan struktural dengan material utama breksi batu apung yang selanjutnya akan dikembangkan untuk panel pelat beton pracetak (*stay-in place precast panel*).
2. Mendapatkan teknologi beton semi-pracetak alternatif dengan *HyFRLWAC* untuk lapis *substrate* dan SCC sebagai lapis *topping*.
3. Memberikan kontribusi untuk mendapatkan metode pengujian kekuatan *interface* dua lapis beton yang lebih mudah dan akurat.

## **I.6. Pembatasan Masalah**

Untuk mendapatkan hasil penelitian yang lebih fokus, maka dalam pelaksanaan penelitian ini ditetapkan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Optimasi campuran beton ringan dengan agregat breksi batu apung dilakukan berdasarkan hasil pengujian sifat fisik dan mekanik beton.
2. Usulan metode pengujian kekuatan lekat *interface* dikembangkan berdasarkan analisis tegangan dengan metode elemen hingga.
3. Tidak dilakukan analisis keekonomian.

## **BAB II**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **II.1. Beton**

Beton merupakan campuran antara bahan agregat halus dan kasar dengan pasta semen (kadang-kadang juga ditambahkan *admixtures*), campuran tersebut apabila dituangkan ke dalam cetakan kemudian didiamkan akan menjadi keras seperti batuan. Proses pengerasan terjadi karena adanya reaksi kimiawi antara air dengan semen yang terus berlangsung dari waktu ke waktu, hal ini menyebabkan kekerasan beton terus bertambah sejalan dengan waktu. Beton dapat juga dipandang sebagai batuan buatan di mana adanya rongga pada partikel yang besar (agregat kasar) diisi oleh agregat halus dan rongga yang ada di antara agregat halus akan diisi oleh pasta (campuran air dengan semen) yang juga berfungsi sebagai bahan perekat sehingga semua bahan penyusun dapat menyatu menjadi massa yang padat.

Bahan penyusun beton meliputi air, semen portland, agregat kasar dan halus, serta bahan tambah (jika diperlukan), di mana setiap bahan penyusun mempunyai fungsi dan pengaruh yang berbeda-beda. Sifat yang penting pada beton adalah kuat tekan, bila kuat tekan tinggi maka sifat-sifat yang lain pada umumnya juga baik. Faktor-faktor penting yang dapat mempengaruhi kualitas beton adalah kualitas bahan penyusun, faktor air-semen, gradasi agregat, cara pengerjaan (pencampuran, pengangkutan, pemadatan dan perawatan) serta umur beton.

#### **II.2. Beton Ringan**

Beton normal merupakan bahan yang cukup berat, dengan berat sendiri mencapai  $2400 \text{ kg/cm}^3$ . Untuk mengurangi beban mati pada suatu struktur beton maka telah banyak dipakai jenis beton ringan. Menurut Standar

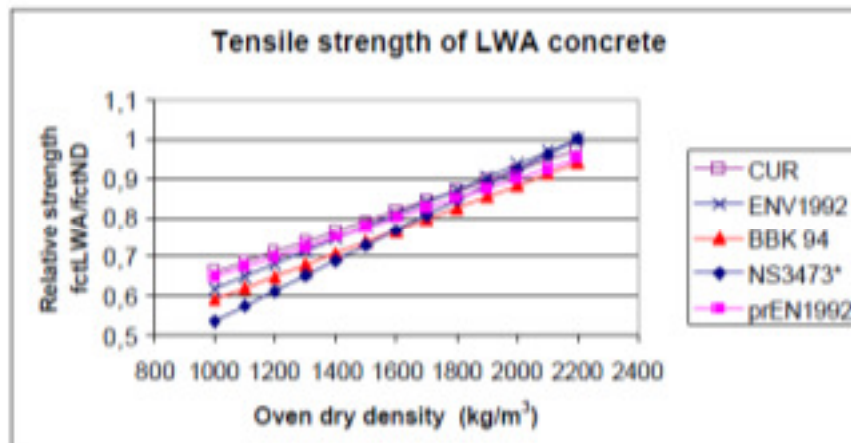
Nasional Indonesia 03-2847 tahun 2000, beton dapat digolongkan sebagai beton ringan jika beratnya kurang dari 1900 kg per meter kubik. Pada dasarnya beton ringan dapat diperoleh dengan cara-cara berikut :

- a. Membuat gelembung-gelembung gas/udara dalam adukan semen, sehingga akan terjadi banyak pori-pori udara di dalam betonnya.
- b. Menggunakan agregat dengan berat jenis yang ringan, misalnya tanah liat bakar, batu apung dan butiran polystyrene.
- c. Pembuatan beton dengan menghilangkan fraksi agregat halus, beton jenis ini dikenal sebagai beton tanpa pasir (*no-fines concrete*) yang hanya dibuat dari semen, agregat kasar (dengan ukuran butir maksimum 20 mm atau 10 mm) dan air. Beton jenis ini akan memiliki ukuran pori yang relatif sama, sedangkan agregat yang sering dipakai adalah kerikil alami (batu apung), terak tanur tinggi dan tanah liat bakar.

Menurut kegunaannya beton ringan dapat diklasifikasikan menjadi 3 golongan, yaitu :

- a. Beton ringan struktural dengan kuat tekan karakteristik minimal 17 MPa dengan berat isi antara 1350 sampai dengan 1900 kg/m<sup>3</sup>.
- b. Beton ringan kekuatan sedang dan juga tingkat insulasi panas sedang, pada umumnya memiliki kuat tekan 7 MPa sampai 17 MPa.
- c. Beton ringan sebagai insulator thermal yang pada umumnya memiliki berat isi antara 300 sampai dengan 800 kg/m<sup>3</sup> (Neville, 1996).

EuroLightCon (2000), menyatakan bahwa beton ringan memiliki kuat tarik lebih rendah dari beton normal. Berbagai standar perencanaan di Eropa telah memberikan faktor reduksi kuat tarik beton berdasarkan berat jenis beton ringan yang dihasilkan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1 di bawah ini.



Gambar 2.1 Faktor Reduksi Kuat Tarik Beton Ringan Menurut Berbagai Standar Perencanaan Beton (EuroLightCon, 2000)

Nawy (2008) menyebutkan bahwa kuat tarik beton ringan pada umumnya lebih kecil bila dibandingkan dengan beton normal. Hal ini sejalan dengan ketentuan yang terdapat dalam klausul dalam ACI 318-08, yang menyebutkan bahwa

$$F_{ct} = \lambda \cdot 6,7 \sqrt{f_c} \text{ (Psi)} \quad (2.1)$$

$$f_r = 1,09 f_{ct} \leq \lambda \cdot 7,5 \sqrt{f_c} \text{ (Psi)} \quad (2.2)$$

di mana:

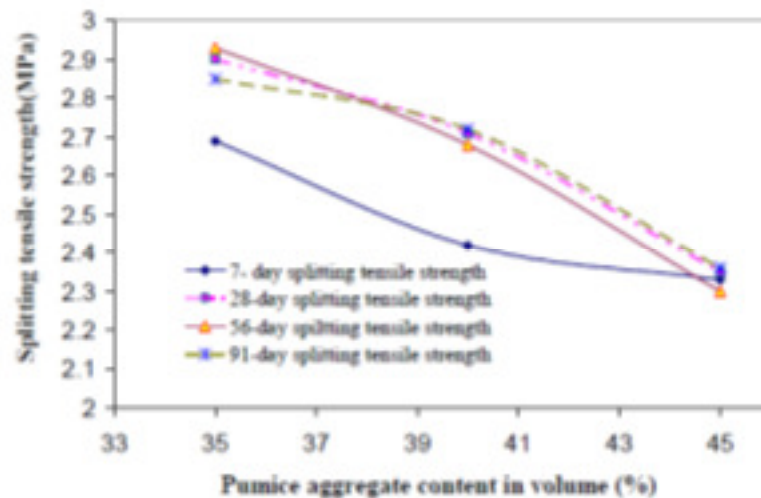
$f_r$  = kuat tarik lentur beton

$f_{ct}$  = kuat tarik belah beton

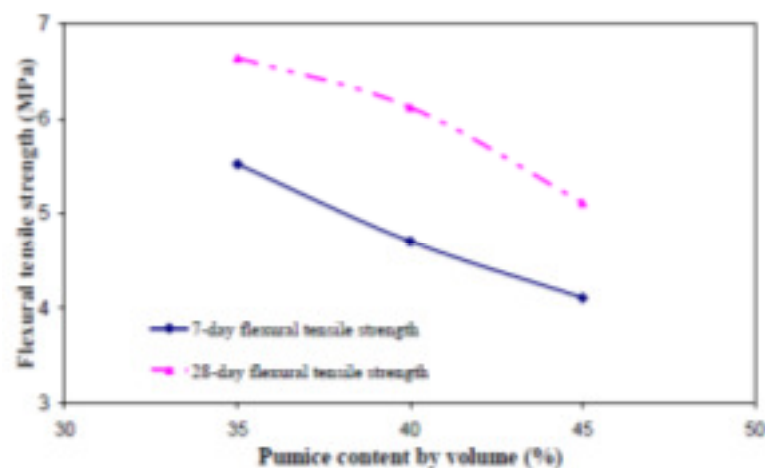
$f_c$  = kuat tekan beton

$\lambda$  = 0,75 untuk *all-lightweight aggregate concrete* dan  
= 0,85 untuk *sand-lightweight concrete*

Xiaopeng (2005), berhasil mengembangkan beton ringan struktural dengan agregat kasar batu apung yang mencapai kuat tekan antara 18 MPa sampai dengan 28 MPa. Dalam penelitian tersebut, dapat ditengarai bahwa semakin banyak volume batu apung yang digunakan maka akan semakin kecil kuat tarik belah dan kuat tarik lentur yang dihasilkan. Hasil penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.2 dan gambar 2.3.



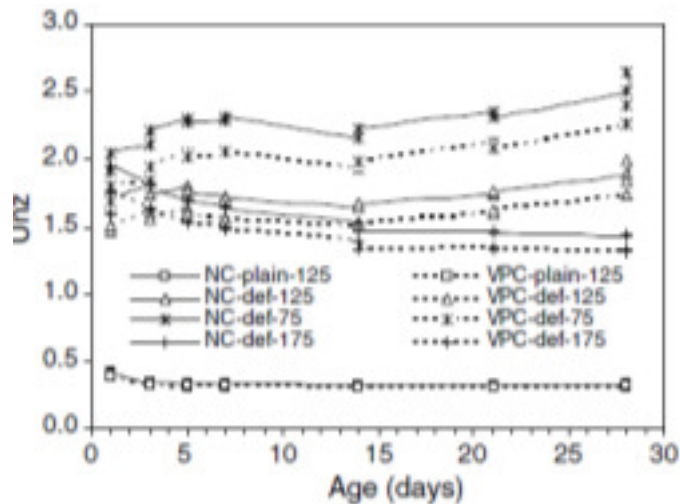
Gambar 2.2 Hubungan antara Volume Agregat Batu Apung dengan Kuat Tarik Belah Beton Ringan Struktural (Xiaopeng, 2007)



Gambar 2.3 Hubungan antara Volume Agregat Batu Apung dengan Kuat Lentur Beton Ringan Struktural (Xiaopeng, 2007)

Hossain (2008), dalam penelitiannya di Universitas Ryerson, Kanada, telah berhasil mengembangkan beton ringan struktural dengan agregat kasar batu apung yang mencapai kuat tekan lebih dari 29 MPa. Kendatipun demikian, ditengarai bahwa kuat lekat tulangan beton ringan tersebut lebih rendah bila dibandingkan dengan beton normal, sebagaimana digambarkan pada Gambar 2.4 di bawah ini.



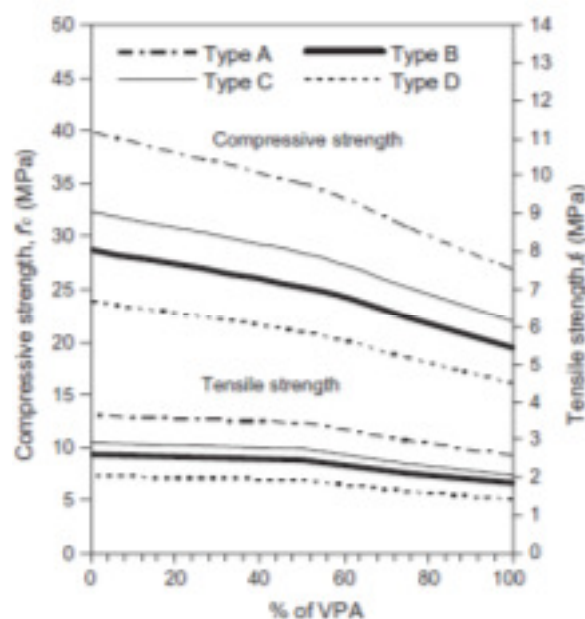


Gambar 2.4 Hasil Uji Kuat Lekat Tulang Beton Ringan dan Beton Normal (Hossain, 2008)

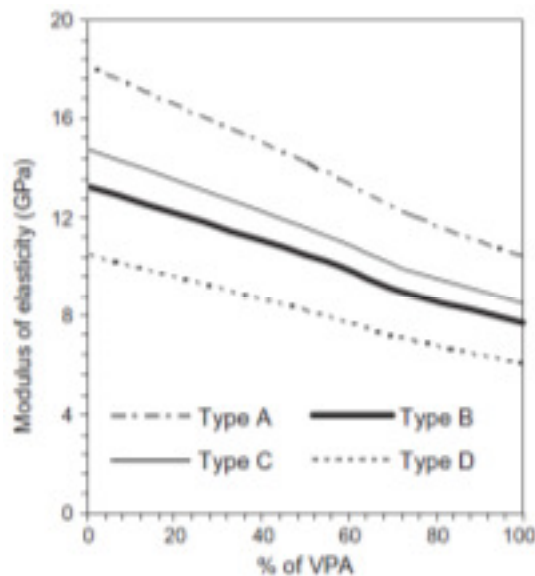
Kabay and Akoz (2011) telah melakukan penelitian untuk mengetahui teknik pengadukan beton ringan yang paling baik dengan agregat kasar batu apung. Peneliti dari Turki tersebut memperbandingkan 3 (tiga) metode pengadukan: 1) *pre-soaked*; dilakukan penambahan air berdasarkan nilai serapan air batu apung dalam 1 jam perendaman, 2) *pre-wetted*; di mana batu apung direndam selama 24 jam sebelum dilakukan pengadukan, 3) *vacuum-soaked*, di mana batu apung diletakkan dalam ruangan untuk kemudian dilakukan *vacuum* kemudian diisi air ke dalam ruang *vacuum* selama 10 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknik *vacuum-soaked* menghasilkan kuat tekan beton ringan yang paling baik, namun cara ini memiliki tingkat kesulitan dan kebutuhan alat yang rumit. Cara *pre-wetted* menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah sekitar 2,50% dibandingkan metode *vacuum-soaked*, namun jauh lebih mudah untuk dilaksanakan. Sedangkan metode *pre-soaked* menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah antara 10 sampai 25% dibandingkan metode *vacuum-soaked*. Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini akan dilaksanakan dengan metode *pre-wetted aggregate*.

Green et al. (2011) juga melakukan penelitian untuk meningkatkan kuat tekan beton ringan agregat pumice. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan faktor air semen maksimal 0,25 dan kandungan bahan pengikat (semen dan silica fume) minimal  $620 \text{ kg/m}^3$  dapat dicapai kuat tekan beton lebih dari 35 MPa dengan berat isi  $\pm 1900 \text{ kg/m}^3$ , dan kuat tarik belah sebesar  $\pm 10\%$  dari kuat tekan beton.

Hossain et al. (2011) menyatakan bahwa semakin besar volume fraction agregat pumice di dalam beton maka akan semakin berkurang kuat tekan, kuat tarik dan modulus elastisitas beton, sebagaimana di tunjukkan pada Gambar 2.5 dan Gambar 2.6. Kajian lain menunjukkan bahwa dengan meningkatnya kuat tekan beton ringan beragregat pumice maka akan semakin berkurang rasio kuat tarik terhadap kuat tekan beton.



Gambar 2.5 Hubungan antara Volume Fraction Pumice Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton (Hossain et al., 2011)



Gambar 2.6 Hubungan antara Volume Fraction Pumice Terhadap Modulus Elastisitas Beton (Hossain et al., 2011)

### II.3. *Self-Compacting Concrete*

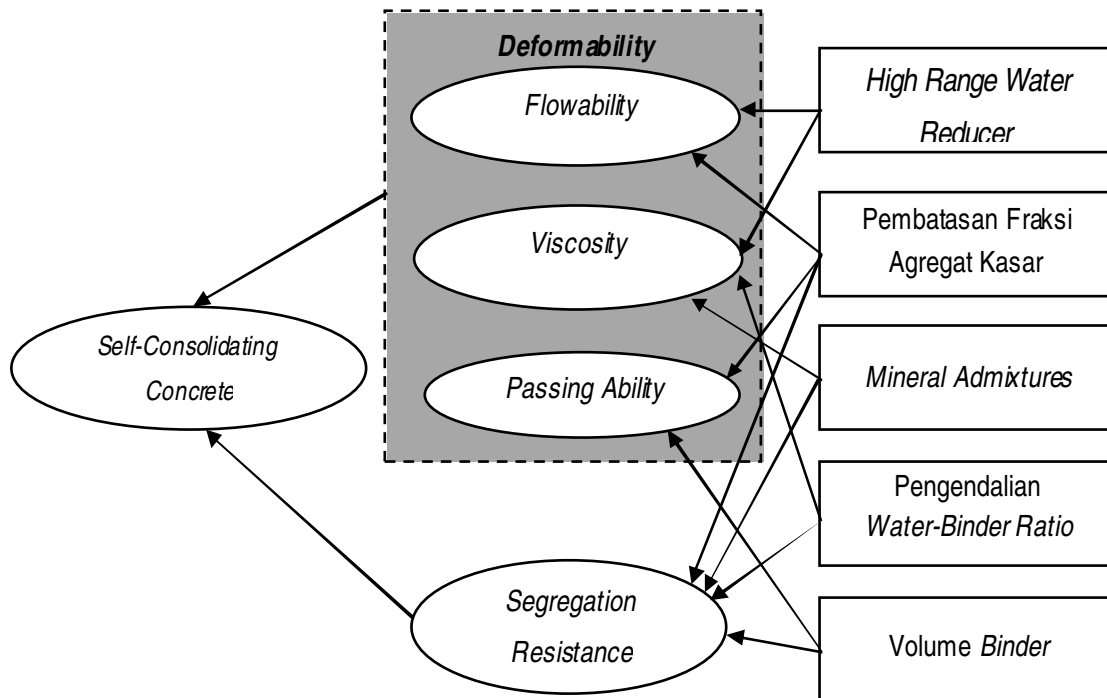
*Self-compacting Concrete* (SCC) dapat didefinisikan sebagai suatu jenis beton yang dapat dituang, mengalir dan menjadi padat dengan memanfaatkan berat sendiri, tanpa memerlukan proses pemadatan dengan getaran atau metode lainnya, selain itu beton segar jenis *self-compacting concrete* bersifat kohesif dan dapat dikerjakan tanpa terjadi segregasi atau *bleeding*. Beton jenis ini lazim digunakan untuk pekerjaan beton pada bagian struktur yang sulit dijangkau dan dapat menghasilkan struktur dengan kualitas yang baik.

*Prototype* dari *self compacting concrete* mulai dikembangkan di Jepang pada awal dekade 1990-an dengan tujuan mendapatkan struktur beton yang memiliki tingkat kepadatan yang tinggi untuk daerah rawan gempa. Berbagai penelitian telah dilakukan dengan hasil yang memuaskan, sehingga saat ini *self compacting concrete* telah digunakan secara luas di berbagai negara dengan aplikasi yang disesuaikan dengan kondisi serta konfigurasi struktur beton yang dibutuhkan.

Keuntungan-keuntungan yang dapat diperoleh dari penggunaan *self compacting concrete* antara lain :

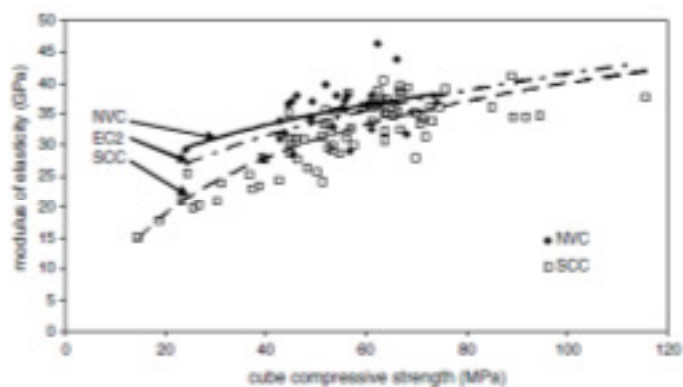
1. Mengurangi lamanya konstruksi dan besarnya upah pekerja.
2. Pemadatan dan penggetaran beton yang dimaksudkan untuk memperoleh tingkat kepadatan optimum dapat dieliminir.
3. Mengurangi kebisingan yang dapat mengganggu lingkungan sekitarnya.
4. Meningkatkan kepadatan elemen struktur beton pada bagian yang sulit dijangkau dengan alat pemadat, seperti vibrator.
5. Meningkatkan kualitas struktur beton secara keseluruhan.

*High range water reducer* diperlukan untuk menghasilkan *self compacting concrete* dengan *workability* dan *flowability* yang tinggi. *Filler*, baik yang bersifat *inert* misalnya serbuk batu kapur (*limestone powder*) ataupun yang bersifat reaktif misalnya *fly ash* atau *silica fume* perlu ditambahkan dalam proses pengadukan *Self Compacting Concrete* untuk meningkatkan homogenitas dan viskositas beton segar (Kheder and Al Jadiri, 2010). *Self Compacting Concrete* mensyaratkan kemampuan mengalir yang cukup baik pada beton segar tanpa terjadi segregasi, sehingga viskositas beton juga harus diperhatikan untuk mencegah terjadinya segregasi (EFNARC, 2005). Hubungan antara penggunaan *superplasticizer* dan sifat beton segar pada proses produksi *self-compacting concrete* dapat ditunjukkan pada Gambar 2.7.



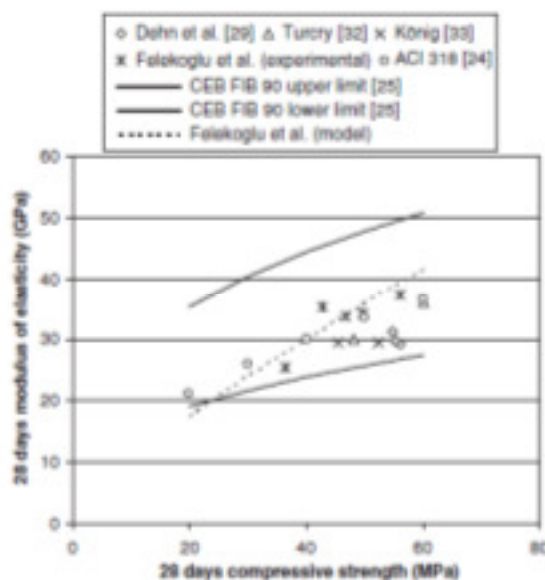
Gambar 2.7 Prinsip Dasar Proses Produksi *Self-Compacting Concrete*

Menurut Domone (2007), SCC memiliki modulus elastisitas yang lebih rendah bila dibandingkan dengan beton normal. Semakin rendah mutu beton maka akan terlihat perbedaan nilai modulus elastisitas yang lebih besar, sebaliknya semakin tinggi mutu beton maka akan semakin kecil perbedaan modulus elastisitas SCC dengan beton normal. Perbedaan modulus elastisitas SCC dan beton normal ditunjukkan pada Gambar 2.8.



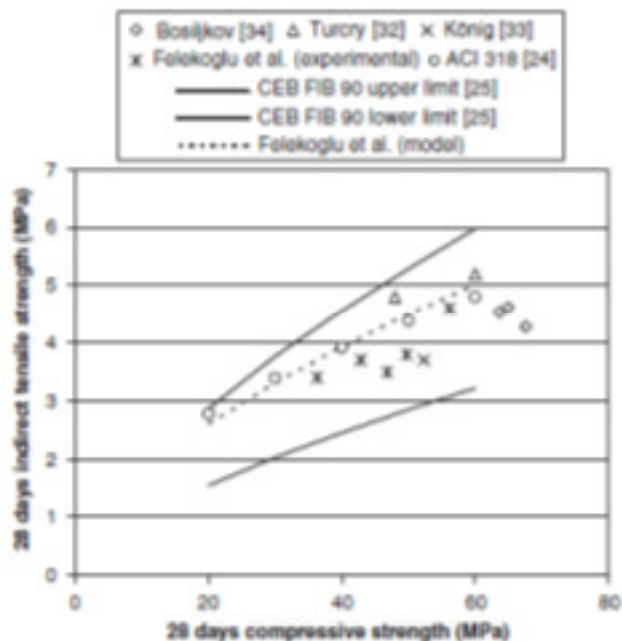
Gambar 2.8 Perbedaan Modulus Elastisitas SCC dengan Beton Normal (Domone, 2007)

Felokoglu et al. (2007), mengemukakan bahwa modulus elastisitas *self-compacting concrete* (SCC) bernilai sedikit lebih rendah dari beton normal. Hal ini mungkin disebabkan karena SCC lebih banyak mengandung agregat halus dan pasta semen jika dibandingkan dengan beton normal. Kendatipun demikian, perbedaan tersebut tidak cukup signifikan dan modulus elastisitas SCC masih berada di antara batas bawah dan batas atas kurva hubungan kuat tekan dan modulus elastisitas yang ditetapkan CEB FIB 90, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9.



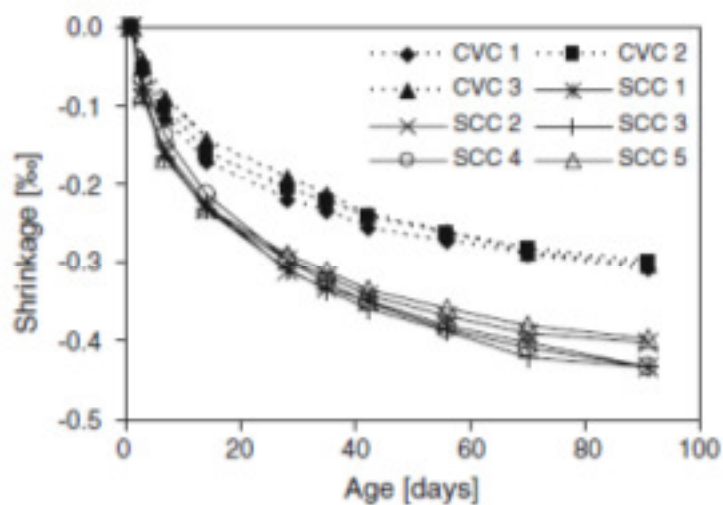
Gambar 2.9 Hubungan Kuat Tekan dengan Modulus Elastisitas SCC (Felokoglu et al., 2007)

Di lain pihak, para peneliti di atas menyatakan bahwa SCC memiliki nilai kuat tarik tak langsung (*indirect tensile strength*) sedikit lebih tinggi dari beton normal. Meskipun demikian, perbedaan tersebut juga tidak terlalu signifikan dan nilai *indirect tensile strength* SCC juga masih berada di antara batas bawah dan batas atas kurva hubungan kuat tekan dan *indirect tensile strength* yang ditetapkan CEB FIB 90, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Hubungan Kuat Tekan dengan *Indirect Tensile Strength* SCC (Felokoglu et al., 2007)

Berkaitan dengan susut beton, Loser and Leemann (2009), menyatakan bahwa SCC dengan berbagai komposisi campuran memiliki besaran susut yang lebih besar bila dibandingkan dengan beton normal. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Komparasi Besaran Susut SCC dan Beton Normal pada Berbagai Umur Beton (Loser and Leemann, 2009)

## **II.4. Beton Berserat (*Fiber Reinforced Concrete*)**

### **1. Definisi Beton Berserat**

Beton bertulang berserat (*fibre reinforced concrete*) didefinisikan sebagai bahan beton yang dibuat dari bahan campuran semen, agregat halus, agregat kasar, air dan sejumlah serat (*fibre*) yang tersebar secara acak dalam matriks campuran beton segar (Hannant, 1978).

### **2. Jenis-Jenis Serat (ACI 544.1R-96)**

- a. Serat-serat logam, seperti serat baja karbon atau serat baja tahan karat
- b. Serat-serat sintetis (acrylic, aramid, nylon, polyester, polypropylene, carbon)
- c. Serat-serat gelas (*glass fibre*)
- d. Serat-serat alami (serat ijuk, bambu, rami, ampas kayu, jerami, sisal, sabut kelapa)

Dalam penelitian ini digunakan serat polypropylene karena mudah diperoleh, murah, awet dan tidak bersifat reaktif terhadap semen.

### **3. Perilaku Beton Berserat**

Perilaku beton berserat ditentukan oleh beberapa faktor, antara lain sifat fisik matrik dan serat dan perlekatan antara serat dan matriknya.

#### **a. Sifat-sifat fisik serat dan matrix**

Hannant menyatakan bahwa faktor utama yang menentukan kemampuan bahan serat adalah sifat fisik serat dan matrik seperti yang diberikan pada Tabel 2.1 dan 2.2 dan kekuatan lekatan diantara keduanya. Tampak dari kedua tabel tersebut bahwa tegangan rata-rata serat adalah dua sampai tiga kali lebih besar dari tegangan runtuh matrix, hal ini akan menyebabkan beton retak sebelum kuat tarik maksimum serat tercapai.



Tabel 2.1 Sifat berbagai macam serat (Hannant, 1978)

<b>Tipe Serat</b>	<b>Kuat Tarik (MPa)</b>	<b>Young modulus, MPa</b>	<b>Perpanjangan batas, %</b>	<b>Specific Gravity</b>
<i>Acrylic</i>	207-414	2.07	25-45	1.1
<i>Asbestos</i>	552-966	82.8-138	0.6	3.2
<i>Cotton</i>	414-690	4.83	3.10	1.5
<i>Glass</i>	1035-3795	69	1.5-3.5	2.5
<i>Nylon (Ht)*</i>	759-828	4.14	16-20	1.1
<i>Polyester (Ht)*</i>	724.5-862.5	8.28	11-13	1.4
<i>Polyethylene</i>	690	0.138-0.414	10	0.95
<i>Polypropylene</i>	552-759	3.45	25	0.90
<i>Rayon (Ht)*</i>	414-621	6.9	10-25	1.5
<i>ROCK wool</i>	483-759	69-117.3	0.6	2.7
<i>Steel</i>	276-2760	200.1	0.5-35	7.8

Ket (Ht)\*: High tenacity

Tabel 2.2 Tipikal sifat-sifat berbagai matrik

<b>Matrik</b>	<b>Kepadatan (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Young modulus (GPa)</b>	<b>Kuat Tarik (MPa)</b>	<b>Regangan Putus x 10<sup>-6</sup></b>
Semen PC Normal	2.000-3.000	10-25	3-6	100-500
Pasta semen alumina kadar tinggi	2.100-2.300	10-25	3-7	100-500
Mortar OPC	2.200-2.300	25-35	2-4	50-150
Beton OPC	2.200-2.450	30-40	1-4	50-150

b. Pengaruh Panjang dan Diameter Serat.

Perbandingan panjang dan diameter serat (aspek ratio) akan mempengaruhi lekatan antara serat dengan matrik. Serat dengan rasio  $l/d > 100$  mempunyai lekatan dengan beton yang lebih besar dibandingkan dengan serat yang pendek dengan rasio  $l/d < 50$ . Menurut Hannant (1978), hasil pengujian untuk  $l/d < 50$  menyebabkan serat akan lebih mudah tercabut dari beton. Peningkatan aspek rasio serat akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik maupun lentur beton, sama halnya dengan penambahan volume serat ke dalam campuran beton.

c. Ukuran maksimum matrik

Ukuran maksimum matrik akan mempengaruhi distribusi dan kuantitas serat yang dapat masuk ke dalam komposit. Hannant D.J memberikan rata-rata ukuran agregat partikel  $\pm 10-30$  mikron, sedangkan ukuran agregat maksimum agregat untuk adukan 5 mm. Agregat dalam komposit tidak boleh lebih besar dari 20 mm dan disarankan lebih kecil dari 10 mm, yang bertujuan agar serat dapat tersebar dengan merata. Untuk menghindarkan terjadinya rongga, pada benda uji disarankan untuk memakai bahan pengisi (agregat campuran) paling sedikit 50 % dari volume beton.

d. Perilaku sifat mekanik beton berserat

Parameter yang diperoleh dari pengujian tekan terhadap beton berserat antara lain : modulus elastisitas, beban hancur maksimum. Dari hasil pencatatan defleksi diperoleh nilai regangan yang terjadi pada saat beban maksimum dan perilaku kurva beban (P) dengan defleksi ( $\delta$ ) atau perilaku kurva tegangan-regangan. Perubahan modulus elastisitas akibat penambahan serat sangat kecil. Penambahan serat pada beton normal dapat meningkatkan tegangan pada beban puncak. Beton berserat menyerap energi yang lebih besar daripada beton normal sebelum hancur (*failure*). Peningkatan terhadap daktilitas dengan penambahan serat pada beton normal tergantung pada beberapa faktor seperti : geometri serat, volume fraksi serat dan komposisi bahan penyusun matrik sendiri. Peningkatan volume serat dapat meningkatkan kapasitas peningkatan energi. Peningkatan penyerapan energi ini terjadi hanya pada batasan 0 – 0,7 % volume fraksi, apabila kandungan serat dinaikkan lagi sehingga fraksinya menjadi lebih besar dari 0,7 %, maka kenaikan energi yang terjadi tidak terlalu besar. Beton bermutu tinggi lebih getas (*brittle*) dibandingkan dengan beton normal, dan dengan penambahan serat dihasilkan beton yang lebih daktil.

Hannant (1978), memberikan persamaan hubungan antara volume fraksi dengan perbandingan serat dalam matriks sebagai berikut:

$$W'f = \frac{\text{Weight of fibre}}{\text{Wight of matrix}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.3)$$

$$W'f = \frac{V_f D_f}{V_m D_m} \times 100\% \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana:

$W'f$  = presentase berat serat terhadap matrik beton, %

$V_f$  = presentase volume fraksi serat terhadap matrik beton, %

$V_m$  = presentase matriks beton, %

$D_f$  = density dari serat, kg/m<sup>3</sup>

$D_m$  = density dari matrik beton, kg/m<sup>3</sup>

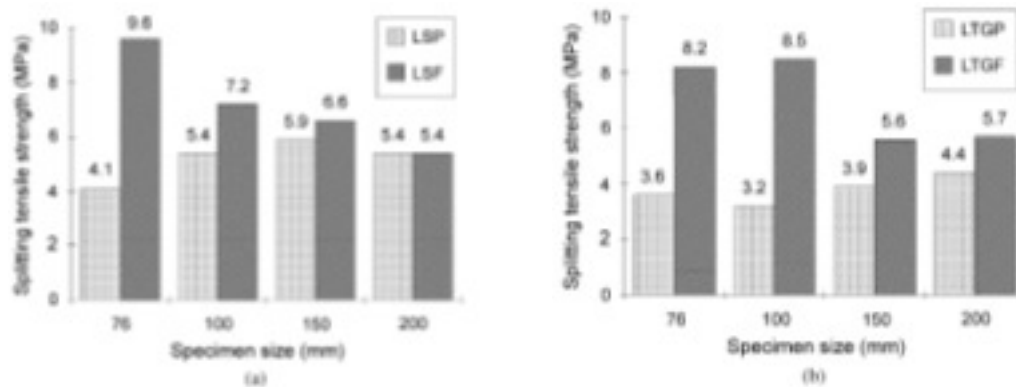
e. Mekanisme kontribusi serat terhadap beban lentur

Dalam aplikasinya, beton berserat lebih banyak digunakan sebagai elemen penahan beban lentur dibandingkan penahan akibat beban lainnya. Hasil percobaan menunjukkan peningkatan kuat lentur lebih tinggi daripada kuat tekan atau kuat tarik belah. Peningkatan kuat lentur sangat dipengaruhi oleh volume fraksi dan aspek rasio serat. Peningkatan volume fraksi sampai batas tertentu akan meningkatkan kuat lentur beton, demikian pula dengan aspek rasio serat.

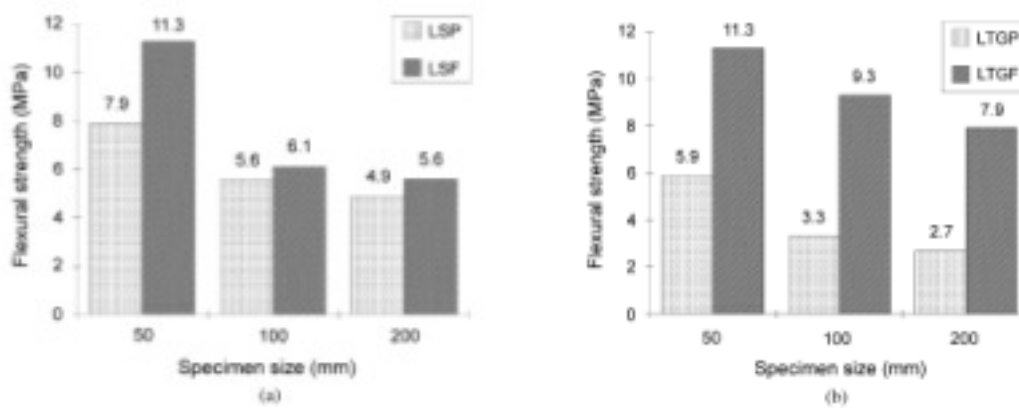
f. Daktilitas (*flexural toughness*)

Salah satu alasan penambahan serat pada beton adalah untuk menaikkan kapasitas penyerapan energi dari matrik campuran, yang berarti meningkatkan daktilitas beton. Penambahan daktilitas juga berarti penambahan perilaku beton terhadap *fatigue* dan *impact*.

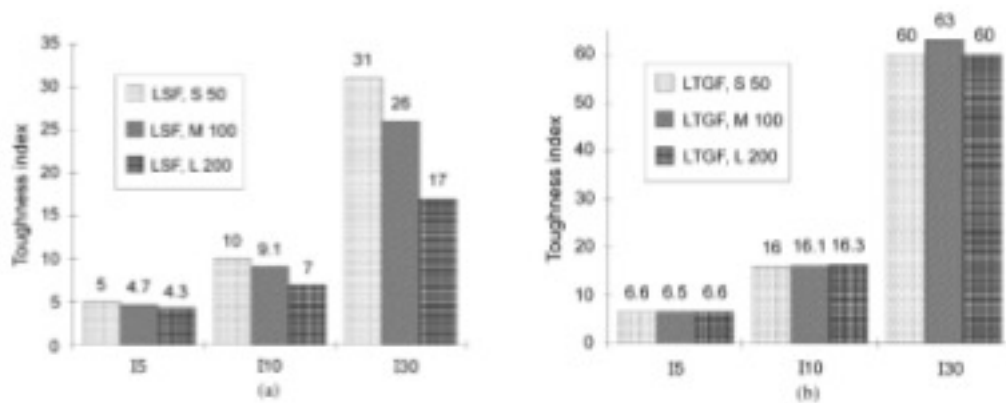
Menurut Balendran et al. (2002), penambahan serat baja dapat meningkatkan kuat tarik belah beton ringan sampai 165% bahkan dapat melampaui kuat tarik belah beton normal dengan bahan tambah serat baja yang sama. Penambahan serat baja juga meningkatkan kuat lentur beton ringan sampai dengan 91%. Hasil penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.12, Gambar 2.13 dan Gambar 2.14.



Gambar 2.12 (a) Pengaruh Penambahan Serat dan Ukuran Benda Uji Terhadap Kuat Tarik Belah Beton Normal, (b) Beton Ringan (Balendran et al., 2002)

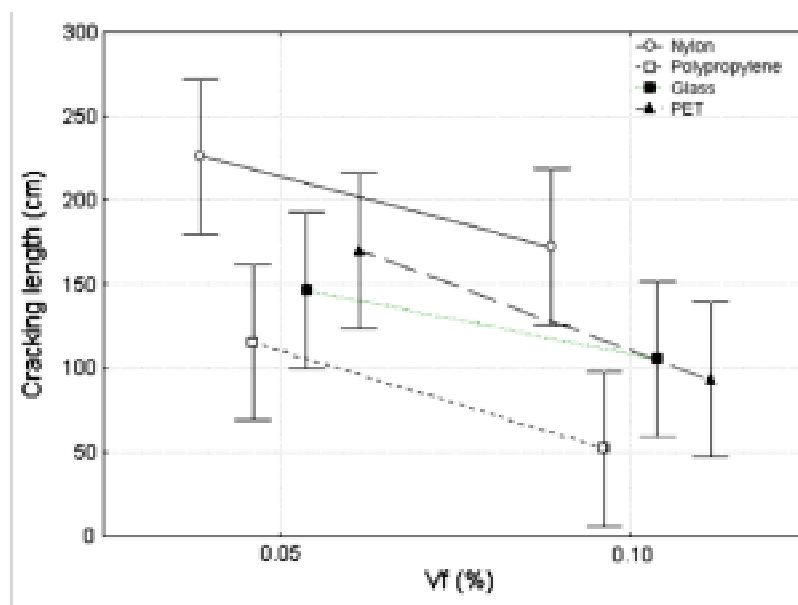


Gambar 2.13 (a) Pengaruh Penambahan Serat dan Ukuran Benda Uji Terhadap Kuat Tarik Lentur Beton Normal, (b) Beton Ringan (Balendran et al., 2002)



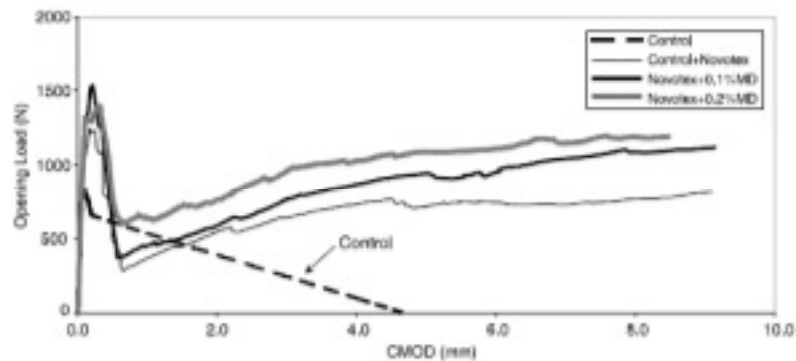
Gambar 2.14 (a) *Toughness Index* Beton Normal Berserat, (b) Beton Ringan Berserat (Balendran et al., 2002)

Penambahan serat ke dalam campuran adukan beton juga terbukti dapat menghambat laju retak akibat susut beton secara efektif. Menurut Pelisser et al., (2010), serat polypropylene merupakan jenis serat yang efektif dalam mengurangi terjadinya retak yang diakibatkan oleh susut beton. Penambahan serat polypropylene tipe *shortcut* dapat mengurangi panjang retak secara lebih efektif dibandingkan dengan serat nylon, PET, maupun *glass fiber*. Pada penelitian tersebut juga diketahui bahwa nilai *volume fraction* 0.10% merupakan kadar optimum penambahan serat polypropylene ditinjau berdasarkan total panjang retak yang terjadi akibat susut beton. Hasil penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.15.



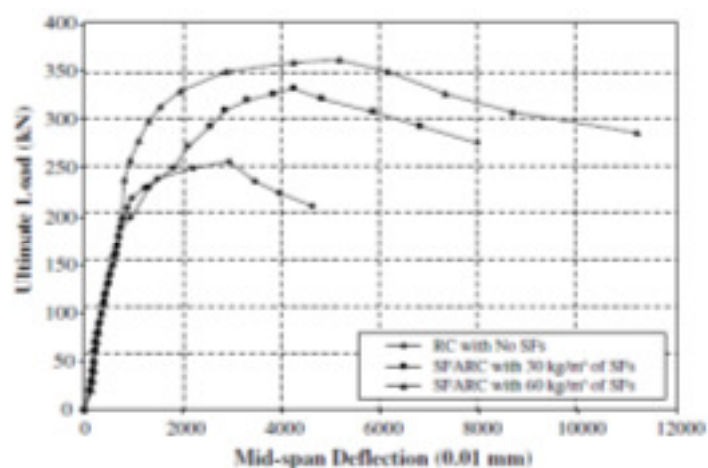
Gambar 2.15 Pengaruh Jenis Serat dan *Volume Fraction* Terhadap Panjang Retak akibat Susut Beton (Pelisser et al., 2010)

Banthia and Nandakumar (2003), menyatakan bahwa penggunaan serat campuran (serat utama berupa serat baja dicampur dengan serat polypropylene) dapat meningkatkan ketahanan *cement-based matrices* terhadap perkembangan retak yang terjadi akibat bekerjanya beban pada spesimen *contoured double cantilever beam* (CDCB) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.16.



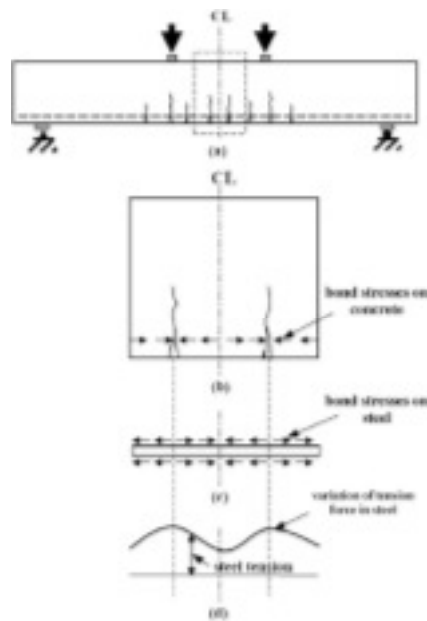
Gambar 2.16 Hubungan Beban dan Lebar Retak (Banthia and Nandakumar, 2003)

Altun et al. (2007), melakukan uji eksperimental untuk mengetahui pengaruh penambahan serat baja berukuran panjang 60 mm dan diameter 0,75 mm terhadap kekuatan mekanik beton dan perilaku lentur balok beton bertulang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan serat baja sebesar  $60 \text{ kg/m}^3$  dapat meningkatkan kuat tarik belah beton hingga 54% dan kuat lentur hingga 46%. Pada pengujian balok beton bertulang, juga terlihat peningkatan kapasitas lentur dan daktilitas beton sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Hubungan Beban dan Lendutan Balok Beton Bertulang dengan Berbagai Penambahan Serat Baja (Altun et al., 2007)

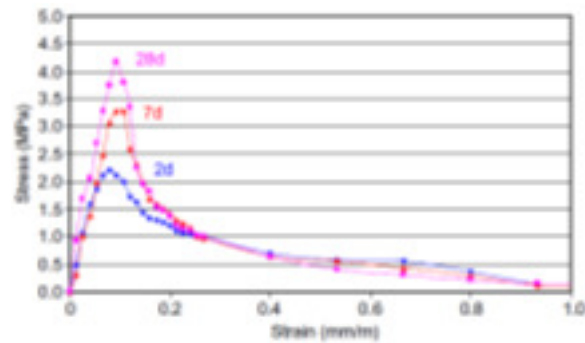
Menurut Ozcan et al. (2008), kemampuan beton serat untuk menghambat terjadinya retak dapat mengurangi besaran tegangan tarik yang berkerja pada baja tulangan sehingga kapasitas *ultimate* beton dapat meningkat, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.18.



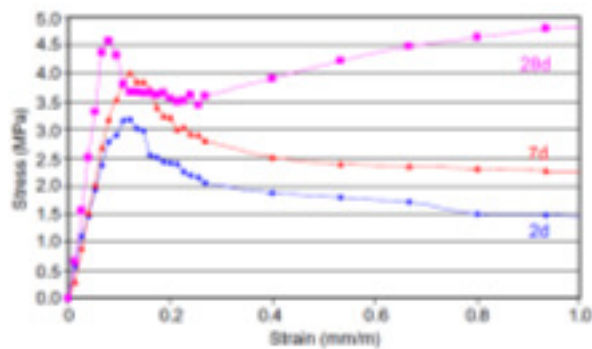
Gambar 2.18 Variasi Gaya Tarik Baja Tulangan dalam Balok Beton Serat Bertulang; (a) Pola Retak Balok, (b) Bentuk Retak, (c) Tegangan pada Lekatan Baja Tulangan dengan Beton, (d) Variasi Gaya Tarik Baja Tulangan (Ozcan et al., 2008)

Camps et al. (2008), menyatakan bahwa penambahan serat baja tipe lurus dapat meningkatkan kuat tarik, sekaligus mempertahankan *residual strength* pasca terjadinya retak akibat bekerjanya gaya tarik pada beton. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada pengujian beton tanpa serat dapat diamati perilaku beton yang *brittle*, dimana setelah dicapainya beban maksimum terlihat peningkatan regangan dan penurunan *residual strength* secara cepat. Selain itu, dapat diamati bahwa setelah munculnya retak akan terjadi lokalisasi perkembangan retak secara cepat. Hal yang berbeda terjadi pada beton serat, dimana setelah dicapai beban maksimum, terjadi peningkatan regangan dan penurunan tegangan yang menandai terjadinya transfer tegangan dari matrix beton ke serat baja, selanjutnya terlihat *residual strength* yang disumbangkan oleh kekuatan

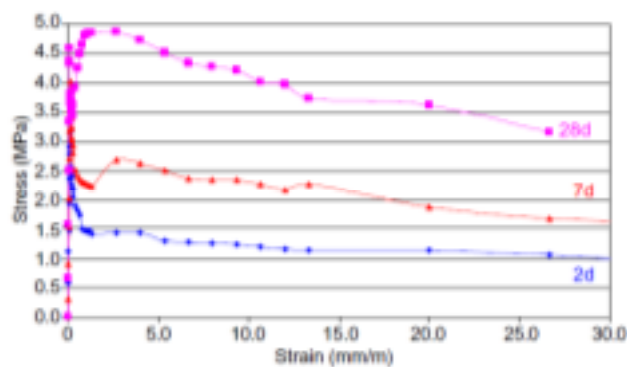
serat dan kuat lekat serat dengan matrix beton di sekelilingnya. Hasil penelitian terkait dapat dilihat pada Gambar 2.19, Gambar 2.20 dan gambar 2.21.



Gambar 2.19 Hubungan Tegangan dan Regangan pada Pengujian Tarik Beton Tanpa Serat (Camps et al., 2008)



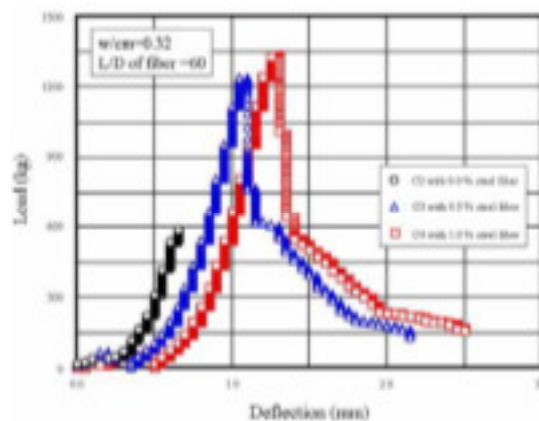
Gambar 2.20 Hubungan Tegangan dan Regangan pada Pengujian Tarik Beton Berserat Baja sampai Regangan 1 mm/m (Camps et al., 2008)



Gambar 2.21 Hubungan Tegangan dan Regangan pada Pengujian Tarik Beton Berserat Baja (Camps et al., 2008)

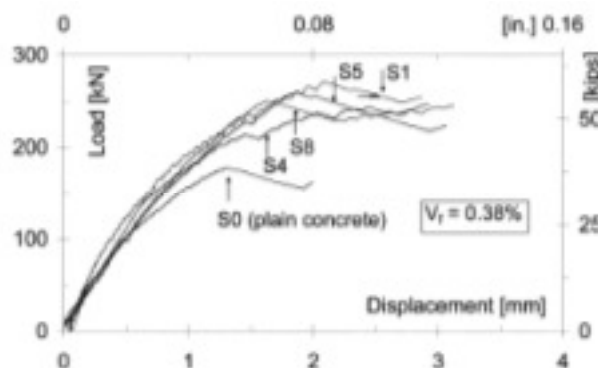


Tsai et al. (2009), menyatakan bahwa penambahan serat baja tipe *double hooke-edge* dapat meningkatkan kuat lentur beton, sekaligus mempertahankan *residual strength* pasca terjadinya beban maksimum akibat bekerjanya beban lentur pada beton, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.22.



Gambar 2.22 Hubungan Beban dan Lendutan pada Pengujian Lentur Beton Berserat Baja (Tsai et al., 2009)

Elsaigh (2001), telah melakukan pengujian eksperimental dan membuktikan bahwa *steel fiber reinforced concrete (SFRC)* untuk struktur *slabs on ground* dapat mengurangi ketebalan plat yang diperlukan sebesar 16,6% dibandingkan jika digunakan material *plain concrete* dengan kuat tekan yang setara, seperti terlihat pada Gambar 2.23.

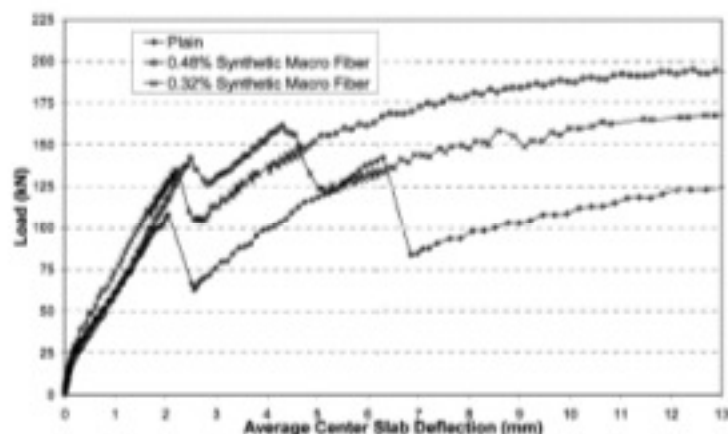


Gambar 2.23 Grafik Hubungan *Load-Displacement* Struktur *Slab on Ground* dengan Penambahan Serat Baja 30 kg/m<sup>3</sup> dengan Dimensi Serat 30/0.6 dan 50/1.0 (Sorelli et al., 2006)

Sorelli et al. (2006), menyatakan bahwa penambahan *steel fibers* dapat meningkatkan beban maksimum yang dapat ditanggung oleh struktur *slabs on ground*. Struktur *plain concrete slabs on ground* dapat menahan beban maksimum sebesar 177 kN, sedangkan dengan menggunakan material *steel fiber reinforced concrete* terjadi peningkatan beban maksimum hingga 260 kN. Selain itu, *SFRC* dapat memberikan respon yang lebih daktail sebagaimana terlihat pada Gambar 2.23.

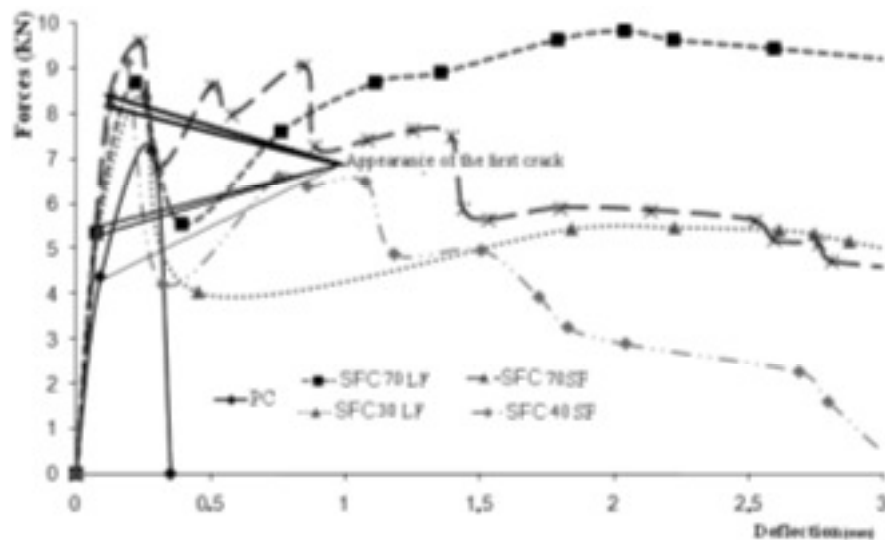
Pada penelitian tersebut juga dapat dinyatakan bahwa dimensi *steel fiber* yang digunakan akan memberikan efek yang berbeda meskipun memiliki *aspect ratio* yang sama. *Steel fiber* dengan panjang 30 mm dan diameter 0,6 mm memberikan efek yang lebih baik bila dibandingkan dengan *steel fiber* yang memiliki ukuran panjang 50 mm dan diameter 1 mm.

Roesler, et al. (2006), melaporkan hasil uji pembebanan *monotonic* pada *slabs on ground* dengan penambahan serat sintetik dapat memperbaiki perilaku lentur *slabs on ground* dibandingkan dengan *plain concrete*. Penambahan serat macro sintetik sebesar 0.32% dan 0.48% (*volume fraction*) dapat meningkatkan *flexural cracking load* sebesar 25% dan 32% pada pembebanan *center load*. Sedangkan nilai *collapse load* dapat ditingkatkan sebesar 20% dan 34%, seperti terlihat pada Gambar 2.24.



Gambar 2.24 Hubungan Beban *Monotonic* dan *Center Slab Deflection* pada Pengujian *Plain and Synthetic Fiber-Reinforced Concrete Slabs* (Roesler et al., 2006)

Ellouze et al. (2010), melaporkan bahwa penggunaan serat baja baik jenis *long fiber* (50 mm) maupun *short fiber* (35 mm) mampu meningkatkan kekuatan lentur pelat dua arah dalam hal beban *first crack*, beban maksimum maupun daktilitas pelat beton bertulang sebagaimana terlihat pada Gambar 2.25.



Gambar 2.25 Hubungan Beban dan Lendutan pada Pengujian Lentur Pelat Dua Arah dengan Berbagai Material Beton (Ellouze et al., 2010)

## II.5. Beton Berserat Campuran (*Hybrid Fiber Reinforced Concrete*)

Untuk meningkatkan efektifitas penambahan serat dalam beton, telah dilakukan berbagai penelitian untuk mencampur atau melakukan hibridisasi serat. Hibridisasi ini dilakukan dengan tujuan mengoptimalkan potensi masing-masing jenis serat, sesuai dengan karakteristik unik yang dimiliki. Hibridisasi dapat dilakukan dengan mencampur beberapa jenis serat dengan panjang, modulus elastisitas, ataupun kuat tarik yang berbeda. Serat yang lebih panjang diharapkan memberikan kontribusi pada perbaikan karakteristik beton sebagai penghambat retak yang berukuran besar (*macrocracks*) dan meningkatkan keliatan atau daktilitas beton. Serat yang berukuran lebih pendek diharapkan dapat memberikan

kontribusi kekuatan saat akan terjadi dan awal terjadinya retak (menghambat laju *microcracks*), serta memperbaiki kekuatan *pull out* fiber menjadi lebih besar. Penambahan serat yang memiliki modulus elastisitas tinggi dapat meningkatkan kekuatan tarik lentur beton secara lebih signifikan, namun kapasitas regangan yang dimiliki kecil. Sebaliknya, pemanfaatan serat dengan modulus elastisitas rendah tidak dapat meningkatkan kekuatan tarik lentur beton secara signifikan, tetapi dapat meningkatkan kapasitas regangan beton dengan signifikan.

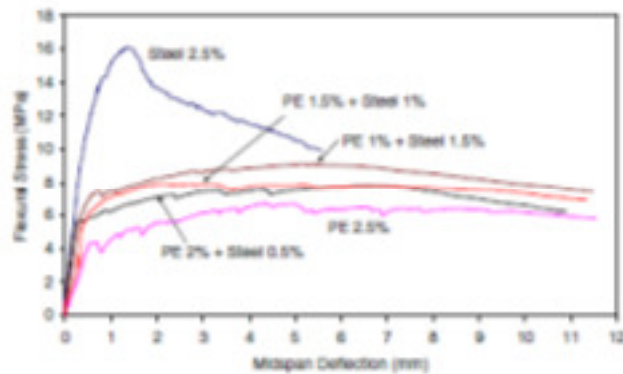
Konsep hibridisasi ini juga telah dibuktikan mampu meningkatkan kekuatan tarik belah beton hingga 36,5%, meningkatkan kuat tarik lentur hingga 32,9%, dan meningkatkan *toughness index* beton hingga 199,5%, dengan menggabungkan serat baja dan serat karbon, maupun serat baja dan serat polypropylene (Yao et al., 2003). Hasil penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.3

Tabel 2.3 Pengaruh Penambahan Berbagai Kombinasi Serat Terhadap Sifat Mekanik Beton

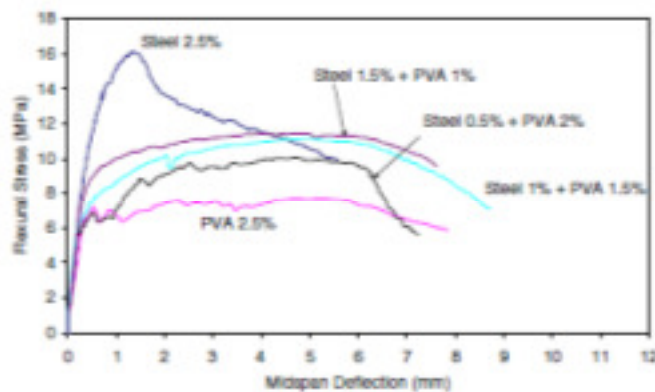
Campuran	Fiber Volume Fraction (%)			fc'	fsp	MOR	Toughness Index		
	Carbon	Steel	PP				I5	I10	I30
1	-	-	-	44.3	4.36	3.16	3.16	5.89	9.78
2	0.5	-	-	50.7	5.21	4.08	4.08	7.48	14.82
3	-	0.5	-	47.8	4.80	4.15	4.15	7.90	22.80
4	-	-	0.5	44.5	4.14	4.04	4.04	6.26	16.76
5	0.2	0.3	-	58.2	5.95	4.23	4.23	8.14	29.32
6	0.2	-	0.3	57.8	5.72	3.89	3.89	6.20	15.90
7	-	0.2	0.3	45.3	4.46	3.40	3.40	6.31	18.44

(Sumber: Yao et al., 2003)

Ahmed et al. (2007), membuktikan bahwa konsep hibridisasi serat dengan mengkombinasikan serat baja dengan serat polyethylene ataupun serat polyvinyl alcohol untuk memperbaiki karakteristik beton dengan bahan tambah abu terbang, terutama dalam hal daktilitas dan kemampuan untuk mencapai lendutan maksimum, maupun mempertahankan *residual strength* pasca fase leleh, seperti terlihat pada Gambar 2.26 dan Gambar 2.27.

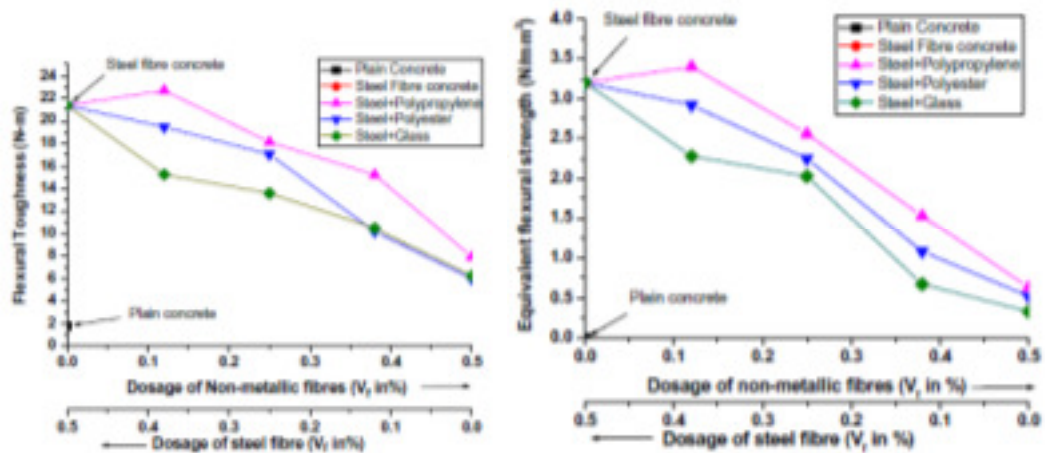


Gambar 2.26 Hubungan antara Tegangan Lentur dan Lendutan Tengah Bentang pada Beton dengan *Fly Ash* Berserat Campuran Baja dan Polyethylene (Ahmed et al., 2007)



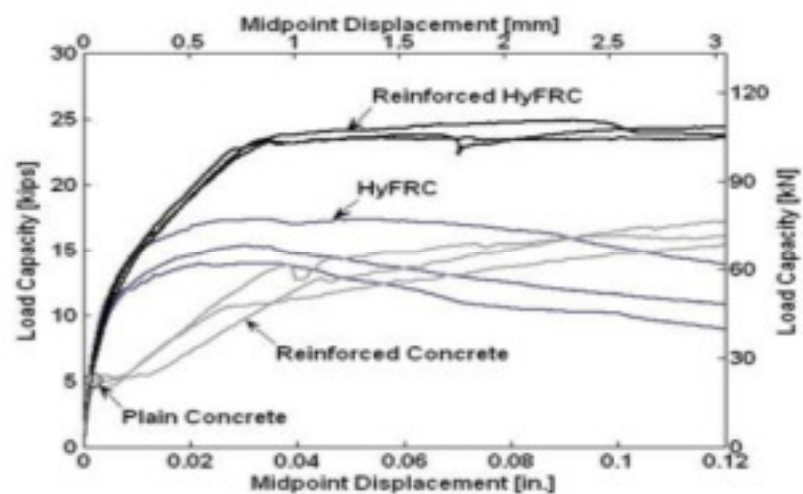
Gambar 2.27 Hubungan antara Tegangan Lentur dan Lendutan Tengah Bentang pada Beton dengan *Fly Ash* Berserat Campuran Baja dan Polyvinyl alcohol (Ahmed et al., 2007)

Aplikasi serat campuran antara *steel fiber* yang ditambah dengan serat *polypropylene* dalam nilai fraksi volume kecil (0.12%), dapat meningkatkan *flexural toughness* melebihi beton yang hanya menggunakan serat baja saja. Hal ini menunjukkan adanya sinergi antara serat baja dengan serat *polypropylene*. Serat *polypropylene* berfungsi pada saat terjadi retak-retak berukuran kecil, dan serat baja akan mengambil peran dalam mempertahankan *post-peak behavior* (Sivakumar and Santhanam, 2007). Hasil penelitian tersebut disajikan pada Gambar 2.28.

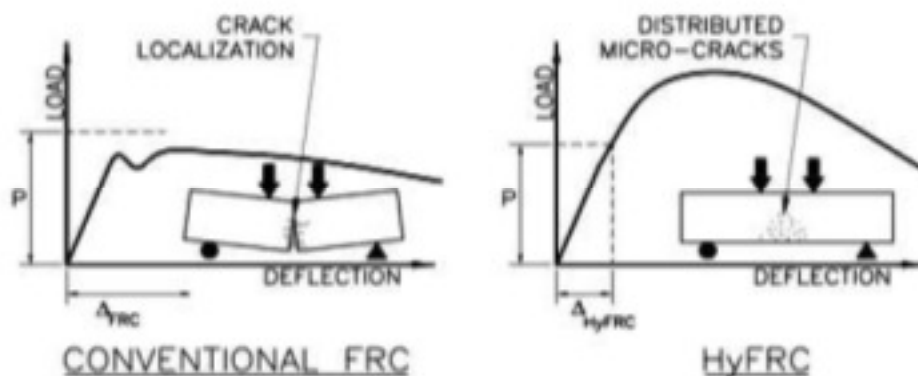


Gambar 2.28 Efek Hibridisasi Serat terhadap *Flexural Toughness* dan *Equivalent Flexural Strength* Beton (Sivakumar and Santhanam, 2007)

Ostertag and Blunt (2007), melaporkan bahwa penggunaan beton berserat campuran mampu meningkatkan kapasitas lentur balok beton bertulang maupun tanpa tulangan bila dibandingkan dengan beton normal seperti terlihat pada gambar 2.29. Penggunaan serat campuran juga dapat menyebarkan retak yang terjadi sehingga tidak terjadi lokalisasi retak seperti ditunjukkan pada Gambar 2.30.

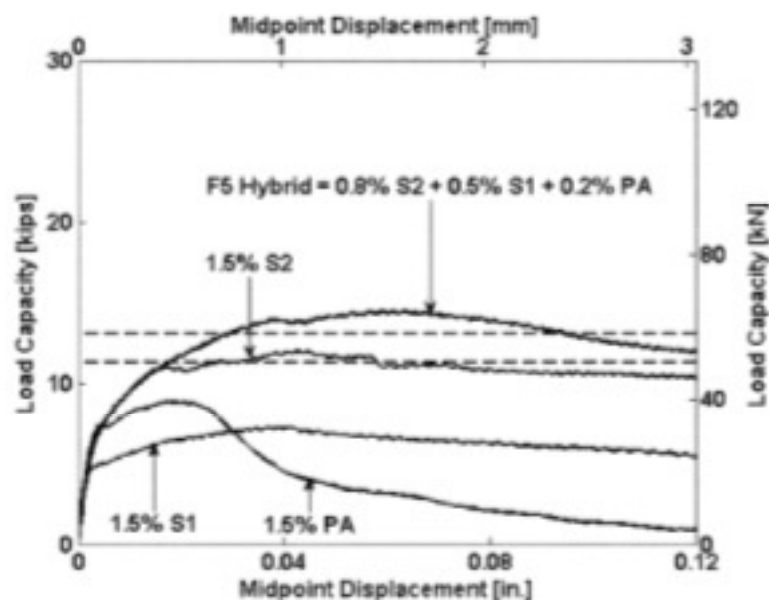


Gambar 2.29 Hubungan Beban dan Lendutan pada Pengujian Lentur Beton Normal dan Berserat Campuran (Ostertag and Blunt, 2007)



Gambar 2.30 Pola Keruntuhan pada Pengujian Lentur Beton Berserat (Ostertag and Blunt, 2007)

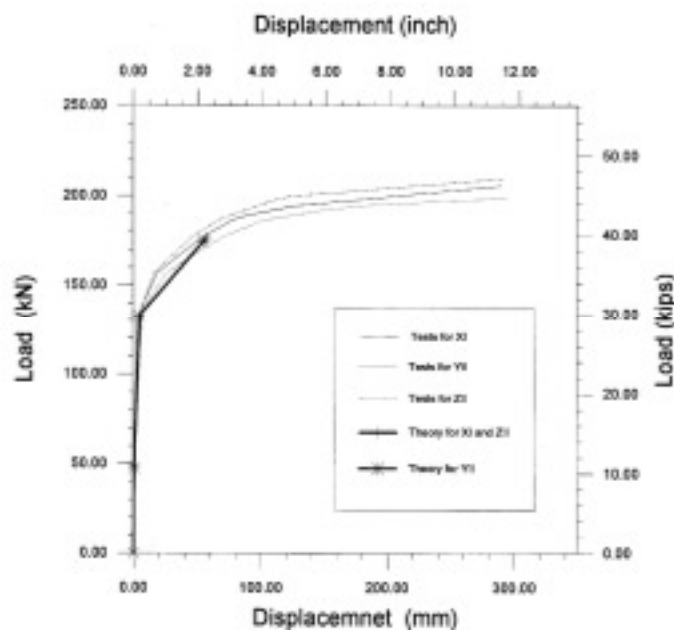
Penelitian lanjutan Blunt and Ostertag (2009), juga menunjukkan bahwa beton berserat campuran mampu meningkatkan kinerja lentur balok beton bertulang maupun tanpa tulangan bila dibandingkan dengan beton berserat konvensional, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.31.



Gambar 2.31 Hubungan Beban dan Lendutan pada Pengujian Lentur Beton dengan Berbagai komposisi Serat (Blunt and Ostertag, 2009)

## II.6. Sistem Konstruksi Beton Multi-lapis (Multi-layer Concrete)

Menurut Mo and Lai (1995), balok beton bertulang dua lapis dengan menggunakan beton berkekuatan tekan sama namun tingkat *workability*-nya berbeda, di mana beton yang memiliki *workability* tinggi digunakan untuk bagian yang menerima beban tarik dan beton dengan *workability* sedang untuk daerah tekan dapat menghasilkan beton bertulang yang mampu menahan beban layan lebih besar dan akan bersifat lebih daktail. Hal ini disebabkan karena beton dengan slump yang lebih tinggi dapat memberikan kuat lekat tulangan lebih baik. Sedangkan beton dengan slump yang rendah dapat mengurangi *bleeding* pada daerah tekan. Hasil penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.32.

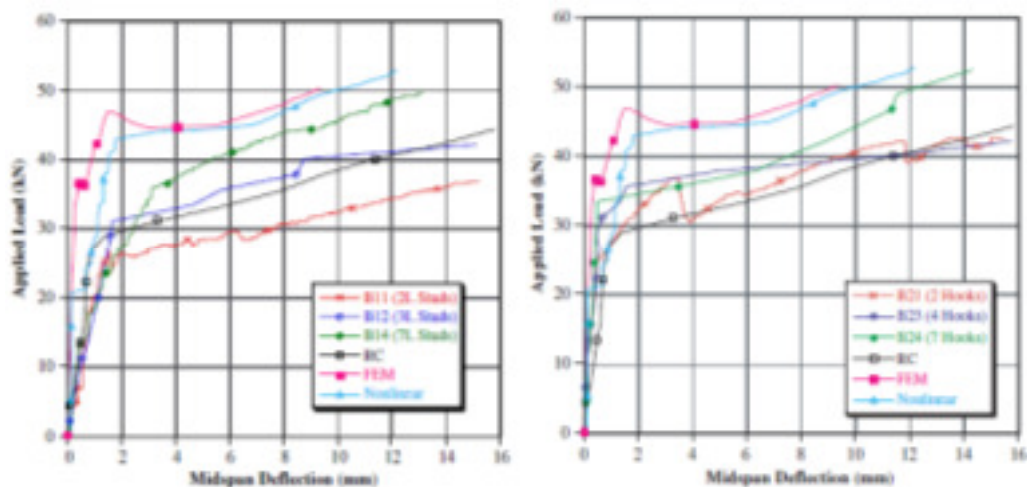


Gambar 2.32 Komparasi *Load-Deflection Curve* antara Balok Beton Bertulang Dua Tahap Pengecoran dengan Nilai Slump Berbeda, Balok Beton Bertulang Sekali Tuang, dan Balok Beton Bertulang Dua Tahap Pengecoran dengan Nilai Slump Sama (Mo and Lai, 1995)

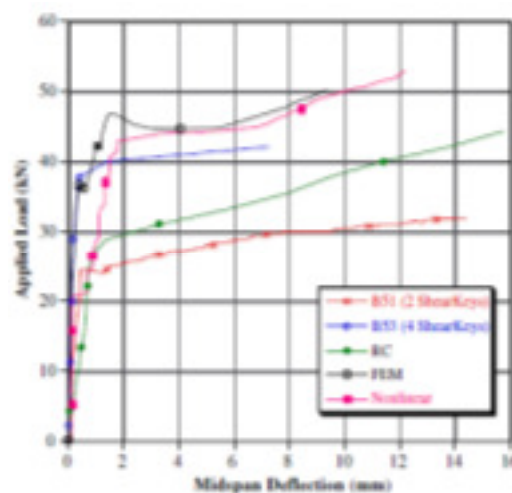
Nassif and Najm (2004), melaporkan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa balok komposit ferrocement dan beton dapat meningkatkan kapasitas lentur balok beton bertulang. Selain itu, juga ditemukan bahwa



bentuk dan konfigurasi *shear connector* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kapasitas lentur balok komposit, di mana bentuk *hook* memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan bentuk *L* biasa. Dalam penelitian ini, *shear keys* juga telah dibuktikan mampu meningkatkan kapasitas lentur balok komposit. Hasil Penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.33 dan Gambar 2.34.

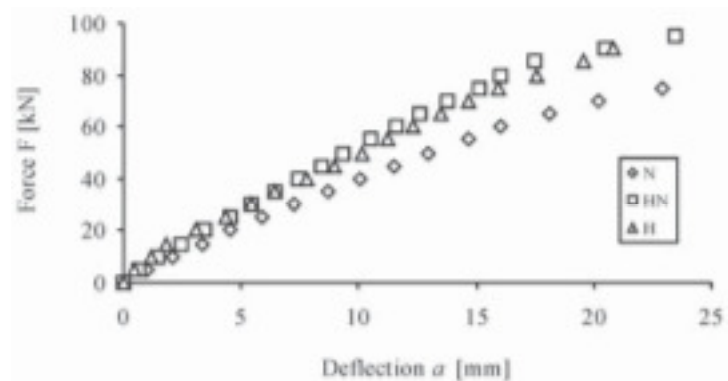


Gambar 2.33 Hasil Uji Balok Komposit Ferrocement dan Beton dengan Bentuk *Shear Connector* yang Berbeda (Nassif and Najm, 2004)



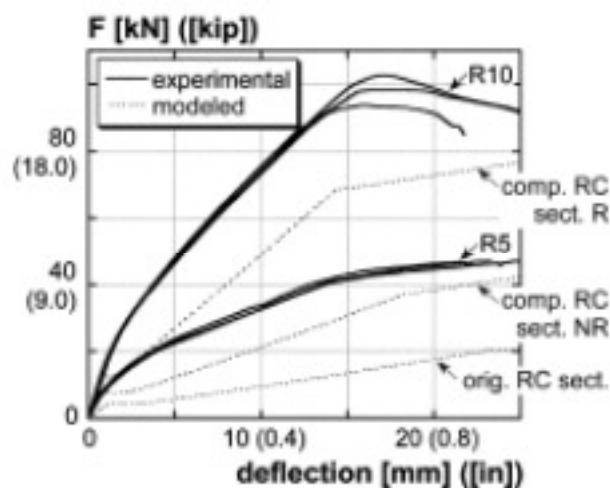
Gambar 2.34 Hasil Uji Balok Komposit Ferrocement dan Beton dengan Penambahan *Shear Keys* (Nassif and Najm, 2004)

Lapko et al. (2005), menjelaskan bahwa penggunaan beton mutu tinggi secara parsial pada daerah tekan dikombinasikan dengan beton normal pada sisi tarik dapat meningkatkan kapasitas layan dan daktilitas balok beton bertulang. Hasil penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.35.

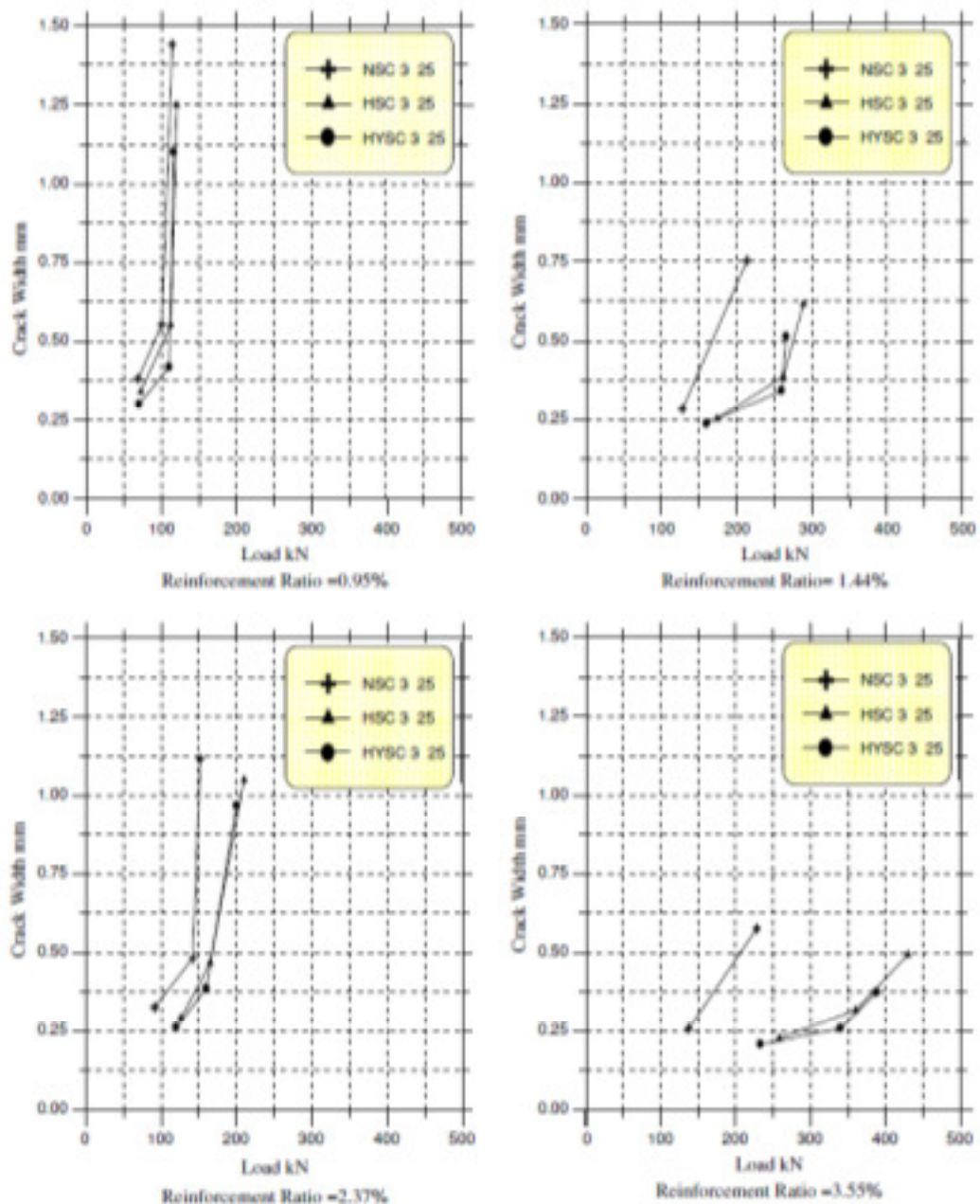


Gambar 2.35 Komparasi *Load-Deflection Curve* antara Balok Beton Bertulang Biasa dengan Balok Beton Bertulang Komposit HSC-NC (Lapko et al., 2005)

Habel et al. (2007), mengkombinasikan *ultra high performance fiber reinforced concrete* dengan beton normal sehingga dapat meningkatkan kapasitas layan beton, mengurangi besaran lendutan untuk beban yang sama, menunda terjadinya *first crack*, dan dapat mengurangi lebar retak yang terjadi. Hasil penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.36.



Gambar 2.36 Komparasi *Load-Deflection Curve* antara Balok Beton Bertulang Biasa dengan Balok Beton Bertulang Komposit UHPFRC-NC (Habel et al., 2007)



Gambar 2.37 Hubungan antara Pembebanan dan Perkembangan Retak pada Balok Beton *Hybrid Strength Concrete* (Kheder et al., 2010)

Pada Gambar 2.37 ditunjukkan hasil penelitian Kheder et al. (2010), yang melaporkan bahwa prototype beton *Hybrid Strength Concrete* (HySC) yang mengkonstruksikan balok beton bertulang dua lapis antara beton normal (NSC) dan beton mutu tinggi (HSC) dapat menanggung beban

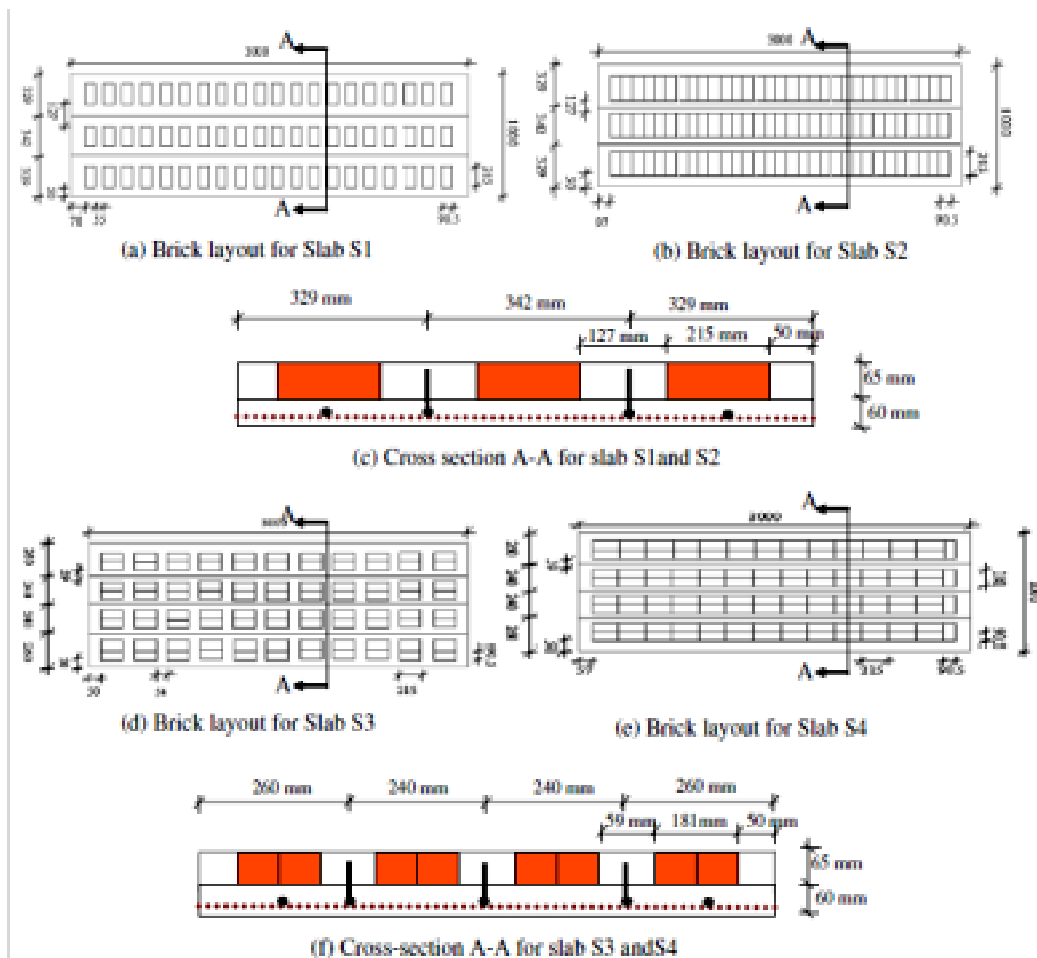
maksimum yang hampir sama dengan balok beton bertulang yang sepenuhnya menggunakan material HSC. Perbedaan yang terjadi hanya berkisar 3,3% sampai 9,8% untuk ratio penulangan antara 0,95% sampai 3,55%.

Balok HySC juga menunjukkan berkurangnya lebar retak rerata pada saat layan maupun saat dicapainya beban puncak. Pengurangan lebar retak yang terjadi berkisar 19,5% sampai 26% bila dibandingkan dengan balok NSC, dan berkurang 9,5% sampai 15,1% dibandingkan balok HSC.

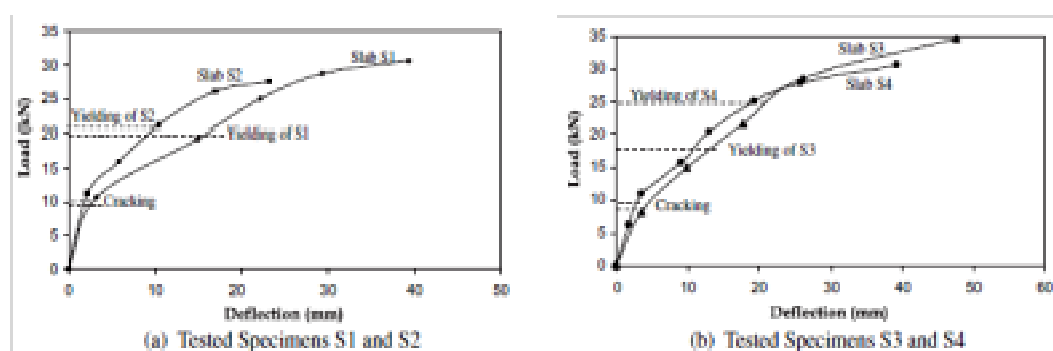
Jarak antar bentukan retak (maksimum, minimum, dan rerata) yang terjadi pada balok HySC terlihat berjarak lebih jauh bila dibanding NSC namun lebih rapat bila dibanding HSC.

Thanoon et al. (2010), melaporkan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa pelat lantai komposit ferrocement dan bata merah dapat dikembangkan untuk elemen structural yang mampu menahan momen hingga 15 kN.m/m.

Hasil penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 2.38 dan Gambar 2.39 tersebut juga menunjukkan bahwa penggunaan *shear connector* berfungsi dengan baik untuk menyatukan kedua lapis material yang digunakan, meskipun demikian dapat diamati bahwa sebelum terjadi kegagalan ditemukan terjadinya retak horisontal memanjang pada daerah tengah bentang.



Gambar 2.38 Bentuk dan Ukuran Benda Uji Pelat Lentur Komposit Ferrocement dan Bata Merah (Thanoon et al., 2010)



Gambar 2.39 Hasil Uji Pelat Lentur Komposit Ferrocement dan Bata Merah (Thanoon et al., 2010)

Konstruksi *multi-layer concrete*, di mana dalamnya terdapat *interface* (pertemuan) antara permukaan beton lama (*substrate*) dengan beton baru (*overlay*) dapat ditemui pada konstruksi baru yang mengadopsi *sandwich system* maupun pada kasus *overlay* perbaikan/rehabilitasi *existing structures* sebagaimana dilakukan pada *rigid pavement*, *industrial floors*, lantai parkir, ataupun *decks* slab jembatan.

Pemilihan jenis material yang digunakan pada lapis *topping/ overlay* didasarkan pada fungsi struktur maupun kondisi lingkungan dimana bangunan didirikan. Jenis-jenis material yang pernah dikembangkan untuk lapis *topping/ overlay* antara lain:

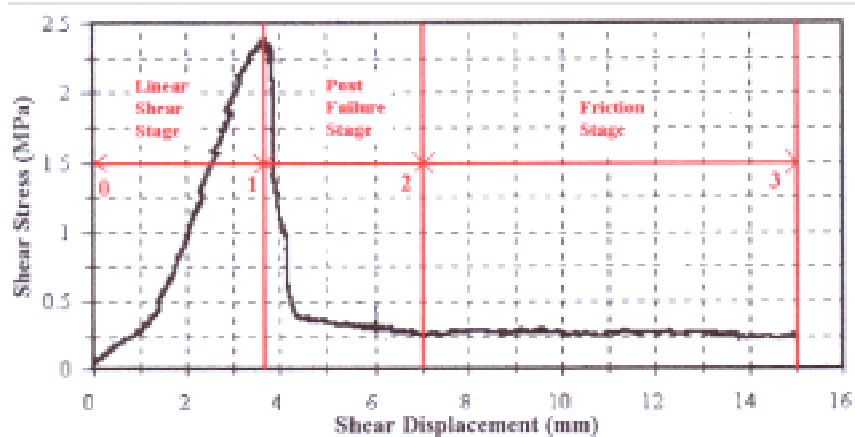
1. *Low Slump High Density Concrete*
2. *Latex Modified Concrete*
3. *Microsilica Modified Concrete*
4. *High Strength Concrete*
5. *Fiber Reinforced Concrete*
6. *Self Compacting Concrete*

## **II.7. Perilaku Kuat Lekat Geser *Interface* pada Beberapa Material Konstruksi**

Dalam *doctoral thesis*-nya, Muslich Hartadi Sutanto (2009), menyampaikan hasil penelitian perilaku *interface* pada struktur perkerasan lentur yang dilakukan oleh Romanoschi dan Metcalf (2002). Dalam penelitian tersebut Romanoschi dan Metcalf menyebutkan bahwa pada fase awal pembebanan terjadi perkembangan yang proporsional antara *shear displacement* dengan besaran *shear stress*, kemudian setelah dicapai kekuatan geser maksimum *interface* terjadi penurunan tegangan geser secara drastis, dan selanjutnya hanya terjadi gesekan/ friksi antar lapis sehingga kuat geser hanya disumbang oleh koefisien gesek antar lapis pada perkerasan lentur, sebagaimana terlihat pada Gambar 2.40.

Romanoschi dan Metcalf (2002) kemudian membagi perilaku geser *interface* perkerasan lentur menjadi 3 (tiga) fase, yaitu:

1. *Linear Shear Stage*,
2. *Post Failure Stage*,
3. *Friction Stage*.



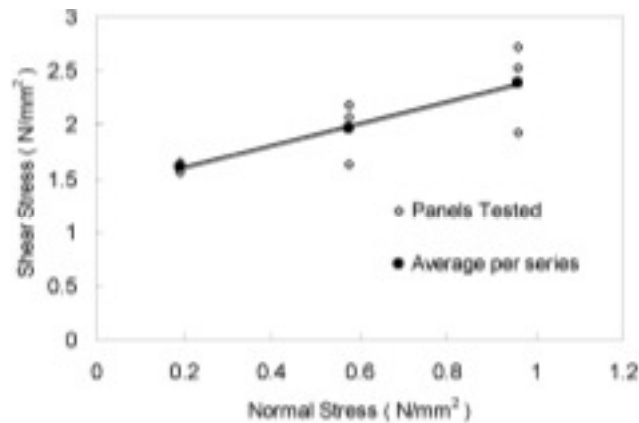
Sumber: Muslich Hartadi Sutanto, 2009

Gambar 2.40 Hasil Pengujian Perilaku Geser *Interface* Perkerasan Lentur/ Aspal (Romanoschi and Metcalf, 2002)

Apabila hasil penelitian di atas dianalogikan dengan struktur *multilayer concrete* dengan mempertimbangkan kenyataan bahwa bekerjanya tegangan geser pada *interface* selalu disertai dengan bekerjanya tegangan normal, maka dapat diduga bahwa komponen penyumbang kekuatan *interface* pada ketiga fase di atas terdiri dari:

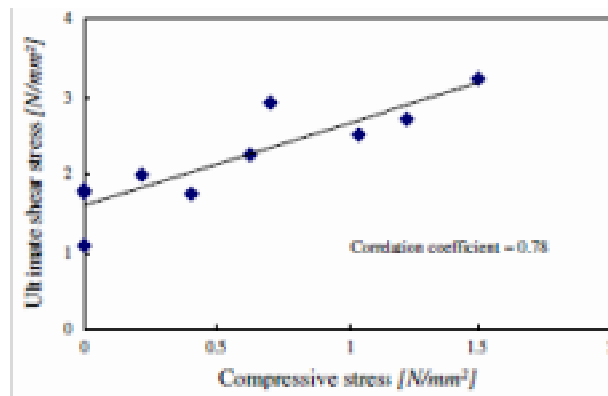
1. *Linear Shear Stage*: *interface bond strength*, tegangan normal, dan koefisien gesek,
2. *Post Failure Stage*: terjadi kehilangan *interface bond strength*,
3. *Friction Stage*: koefisien gesek dan tegangan normal.

Lourenco et al. (2004), menyampaikan laporan penelitian yang berkaitan dengan kekuatan *interface* pada pasangan batu bata. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa bekerjanya tegangan tekan akan meningkatkan kekuatan geser *interface* secara proporsional sebagaimana terlihat pada Gambar 2.41 di bawah ini.



Gambar 2.41 Hasil Eksperimental untuk Hubungan Kekuatan Geser *Interface* Dinding bata dan Tekanan Aksial (Lourenco et al., 2004)

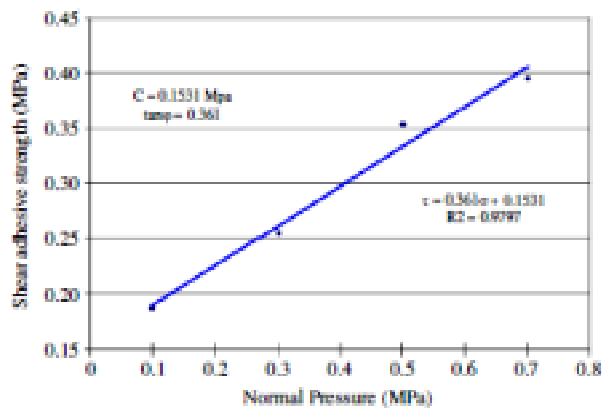
Abdou et al. (2006), menyajikan hasil eksperimental yang memperkuat pendapat yang menyebutkan bahwa bekerjanya tekanan dalam arah tegak lurus bidang geser akan meningkatkan kekuatan geser *interface* secara proporsional sebagaimana terlihat pada Gambar 2.42 di bawah ini.



Gambar 2.42 Hasil Pengujian Pengaruh Gaya Tekan Terhadap Kekuatan Geser *Interface* Batu Bata (Abdou et al., 2006)

Xu et al. (2009), menyampaikan laporan penelitian yang berkaitan dengan kekuatan *interface* pada dua lapis beton yang berbeda umur. Hasil penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa bekerjanya tegangan tekan akan meningkatkan kekuatan geser *interface* secara proporsional sebagaimana terlihat pada Gambar 2.43 di bawah ini.



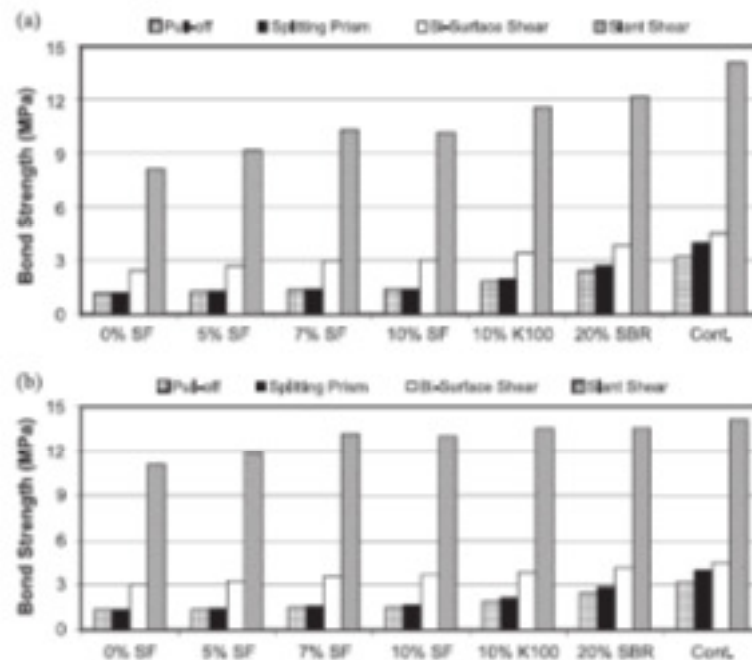


Gambar 2.43 Hasil Eksperimental untuk Hubungan Kekuatan Geser *Interface* Beton dan Tekanan Aksial pada Suhu 25°C (Xu et al., 2009)

## II.8. Efek Komposisi Material Beton Terhadap Kekuatan Lekat *Interface* Beton lama dan Beton Baru

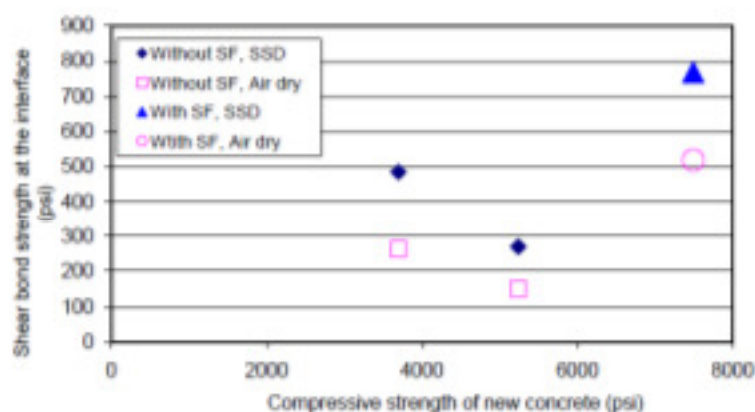
Li et al. (2001), melaporkan bahwa penggunaan pozolan berupa *fly ash* dapat meningkatkan kekuatan *interface* karena penggunaan *fly ash* sebesar 25% dari berat semen yang dibutuhkan dapat meningkatkan kepadatan *interfacial transition zone*.

Hal yang serupa juga dilaporkan oleh Momayez et al. (2004), dimana para peneliti tersebut menyatakan bahwa penambahan 7% *silica fume* dapat meningkatkan kekuatan *interface* sebesar 25%. Hasil penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.44.

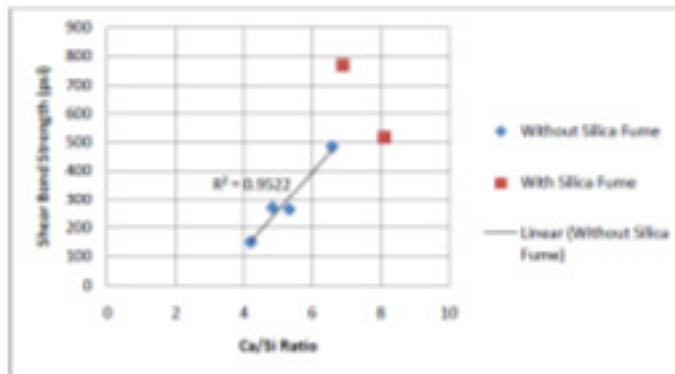


Gambar 2.44 Efek Penambahan *Silica Fume* Terhadap Kuat Geser *Interface* (a) *low roughness* dan (b) *high roughness* (Momayez et al., 2004)

Hal ini diperkuat oleh hasil penelitian Shin and Wan (2010), yang menunjukkan bahwa penambahan *silica fume* dapat meningkatkan kuat geser *interface* sebagai akibat dari meningkatnya ratio Ca/Si (*Calcium Silicate Hydrate/ Calcium Hydroxide*), seperti terlihat pada Gambar 2.45 dan Gambar 2.46.



Gambar 2.45 Efek Penambahan *Silica Fume* dan Kondisi *Substrate* Terhadap Kuat Geser *Interface* (Shin and Wan, 2010)



Gambar 2.46 Efek Ca/Si (*Calcium Silicate Hydrate/ Calcium Hydroxide*) Terhadap Kuat Geser *Interface* (Shin and Wan, 2010)

Menurut Santos and Julio (2011), salah satu faktor yang memberikan pengaruh besar terhadap kekuatan *interface* antara dua lapis beton yang berbeda adalah besarnya *differential shrinkage* antara kedua lapis beton yang digunakan. Semakin besar *diferential shrinkage* yang terjadi maka akan semakin besar tegangan yang terjadi pada *interface* beton. Selain itu, semakin kecil regangan *drying shrinkage* maka akan semakin kecil kuantitas *microcracks* yang terjadi sehingga kualitas *interface* akan semakin meningkat.

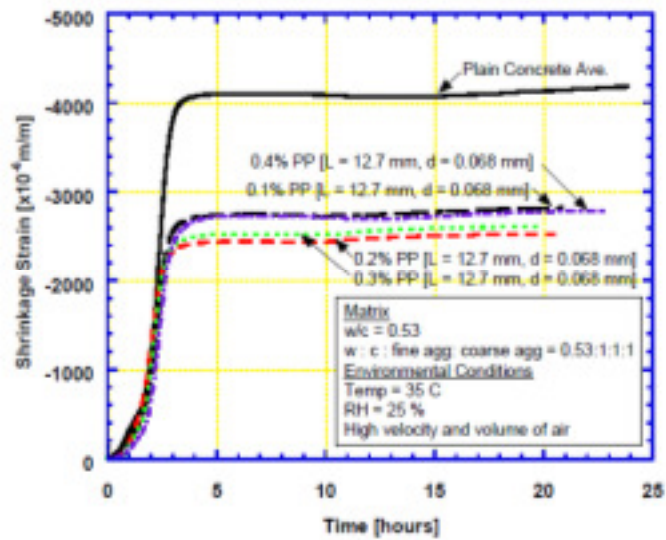
Chen et al. (1995), menyatakan bahwa penambahan serat karbon tipe *short-cut* sebesar 0.35% (*volume fraction*) pada lapis *overlay* dapat memberikan peningkatan kuat geser *interface* beton lama dengan beton baru hingga 89% sebagaimana terlihat pada Tabel 2.4. Peningkatan ini dapat terjadi karena penambahan serat dapat meminimalisir *drying shrinkage* pada lapis *overlay*.

Tabel 2.4 Efek Penambahan Serat Carbon Terhadap Kuat Geser *Interface* (Chen et al., 1995)

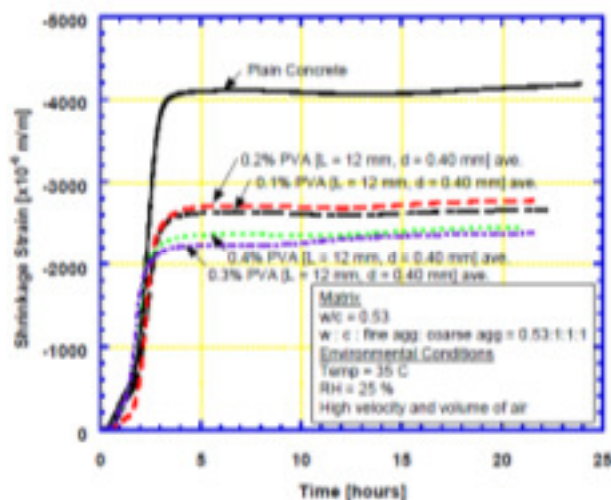
Joint (old-New)	Shear Bond Strength (MPa)		Fractional Increase Due to fibers
	Without fibers	With fibers	
Plain-plain	0.22±0.02	-	-
Plain-M	0.39±0.05	0.63±0.02	62%
Plain-M+SF	0.84±0.02	1.40±0.10	67%
Plain-Latex	0.76±0.03	1.44±0.15	89%

Note : M = methylcellulose; SF = Silica Fume

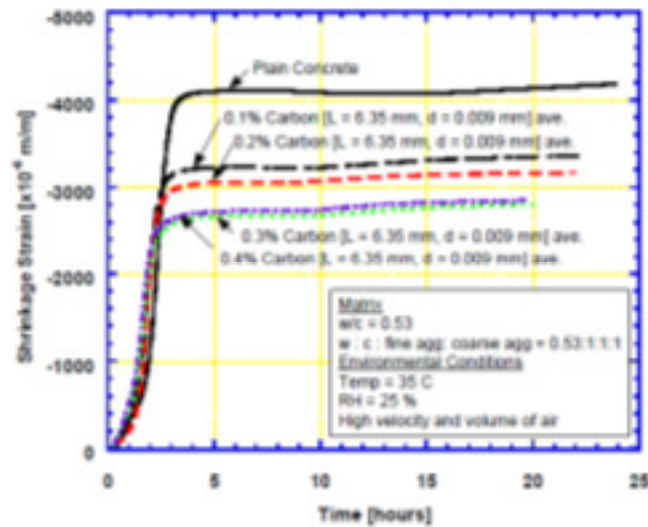
Wongtanakitcharoen and Naaman (2007), juga melaporkan bahwa penambahan serat mikro *polypropylene*, *polyvinyl alcohol*, maupun *carbon* dapat mengurangi besaran *free plastic shrinkage* secara signifikan. Hasil penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.47, Gambar 2.48 dan Gambar 2.49.



Gambar 2.47 Efek Penambahan Serat Polypropylene Terhadap Regangan *Unrestrained Shrinkage* (Wongtanakitcharoen and Naaman, 2007)

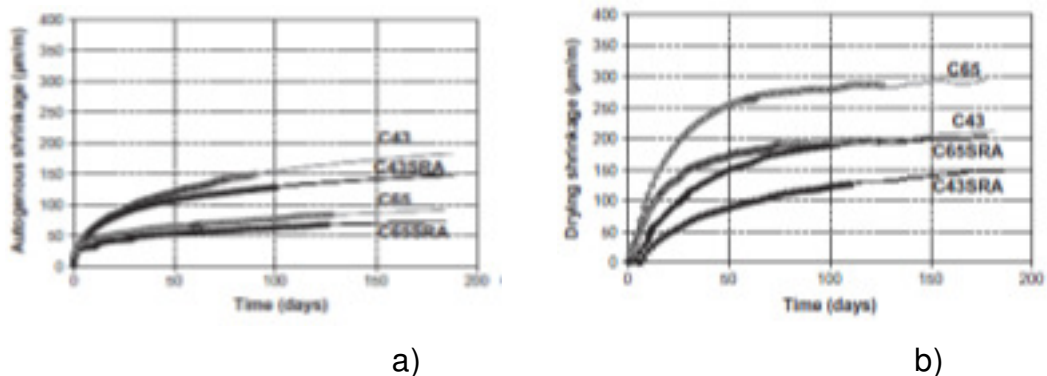


Gambar 2.48 Efek Penambahan Serat Polyvinyl Alcohol Terhadap Regangan *Unrestrained Shrinkage* (Wongtanakitcharoen and Naaman, 2007)

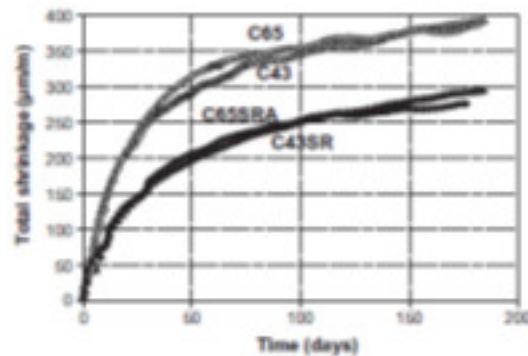


Gambar 2.49 Efek Penambahan Serat Carbon Terhadap Regangan *Unrestrained Shrinkage* (Wongtanakitcharoen and Naaman, 2007)

Saliba et al. (2010), menyatakan bahwa nilai faktor air semen akan memberikan pengaruh terhadap besaran susut beton. Semakin besar nilai fas dapat mengurangi *autogenous shrinkage* yang terjadi, seperti terlihat pada Gambar 2.50.a. Semakin tinggi fas maka akan terjadi *drying shrinkage* dan *total shrinkage* yang lebih besar, seperti terlihat pada Gambar 2.50.b dan Gambar 2.51.



Gambar 2.50 Hasil Pengujian Eksperimental Pengaruh Faktor Air Semen Terhadap a) *Autogenous Shrinkage* dan b) *Drying Shrinkage* Beton tanpa SRA maupun dengan SRA (Saliba et al., 2010)



Gambar 2.51 Hasil Pengujian Eksperimental Pengaruh Faktor Air Semen Terhadap *Total Shrinkage* Beton tanpa SRA maupun dengan SRA (Saliba et al., 2010)

## II.9. Perkembangan Teori *Shear Friction*

### 1. Saemann and Washa (1964)

Saemann and Washa (1964), melakukan pengujian terhadap 42 balok T berukuran penuh untuk menentukan kekuatan geser pada bidang pertemuan antara balok pracetak dengan *cast in place slab*. Dalam pengujian tersebut digunakan 36 variasi pengujian dengan berbagai kombinasi kekasaran bidang geser, persentase tulangan yang terpasang pada bidang geser, bentang geser, posisi bidang geser terhadap garis netral, efek *shear keys*, dan kuat tekan beton. Hasil pengujian memberikan persamaan kekuatan geser *ultimate* sebagaimana Persamaan 2.5:

$$Y = \frac{2700}{X + 5} + 300P \left( \frac{33 - X}{X^2 + 6X + 5} \right) \dots\dots\dots(2.5)$$

dengan:

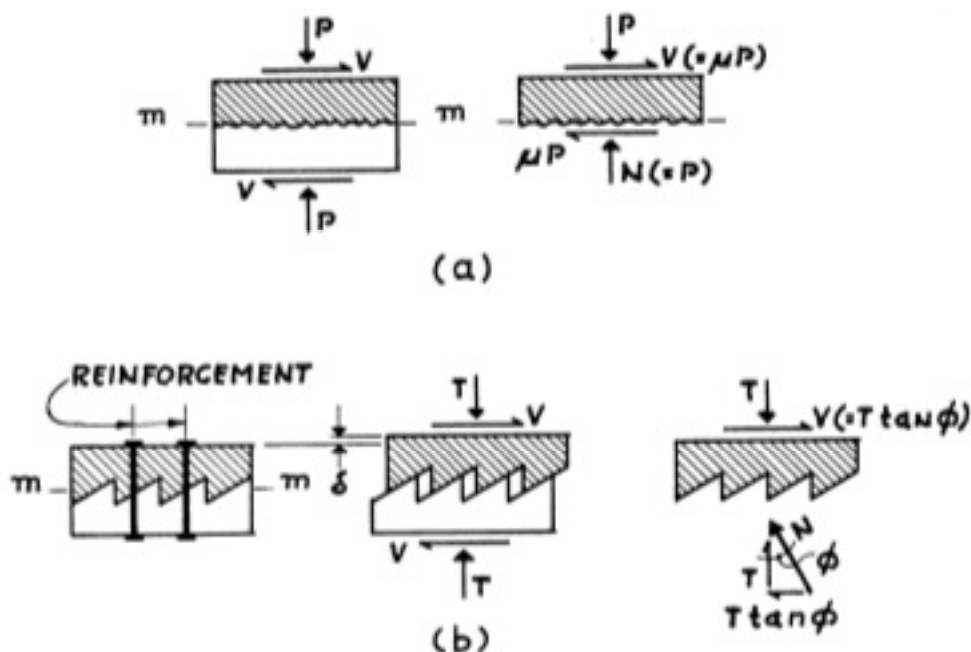
$Y$  = kekuatan geser *ultimate*

$X$  = ketinggian efektif balok (jarak antara sisi tekan terluar beton dengan pusat berat tulangan tarik)

$P$  = persentase baja yang melintasi bidang geser  $\left( \frac{A_{vf}}{A_{cv}} \right)$

## 2. Birkeland dan Birkeland (1966)

Dalam penelitian Birkeland and Birkeland (1966) ini konsep dan persamaan untuk menghitung *shear friction* mulai dikembangkan. Kegagalan geser dideskripsikan sebagai *slip* sepanjang retakan pada beton. *Slip* yang terjadi ditahan oleh friksi ( $\mu P$ ), yang diakibatkan oleh bekerjanya *external clamping force* ( $P$ ). Apabila baja tulangan dipasang pada bidang geser, pergerakan *sliding* menimbulkan tarikan ( $T$ ) pada baja tulangan dan menghasilkan *clamping force* di sepanjang *interface*. Kekasaran bidang retakan beton dideskripsikan sebagai rangkaian gigi gergaji licin dengan sudut kemiringan  $\tan(\phi)$ . Asumsi dasar dari metode ini ditunjukkan pada Gambar 2.52 di bawah ini:



Gambar 2.52 Hipotesis Fenomena *Shear Friction* (Birkeland and Birkeland, 1966)

Kekuatan geser *ultimate* pada *interface* diasumsikan dicapai saat terjadinya leleh pada baja tulangan yang dapat dinyatakan dalam Persamaan 2.6 dan Persamaan 2.7.

$$V_u = A_s \cdot f_y \cdot \tan \phi \dots\dots\dots(2.6)$$

Dalam bentuk tegangan geser dapat dinyatakan:

$$v_u = \frac{A_s f_y \tan \phi}{A_g} = \rho_v f_y \tan \phi \dots\dots\dots(2.7)$$

dengan

$\tan \phi = 1,7$  untuk beton monolith

$\tan \phi = 1,4$  untuk permukaan beton yang dikasarkan

$\tan \phi = 0,8$  sampai  $1,0$  *construction joint* biasa dan  
*interface* beton dengan baja

Hal-hal penting yang dapat dicermati dari hasil penelitian ini adalah:

1. Konsep dasar dari teori ini dibangun berdasarkan beton monolith, namun dikembangkan untuk permukaan yang dikasarkan maupun permukaan bidang geser yang halus.
2. Kekuatan geser disumbangkan oleh friksi bukan lekatan. Baja tulangan pada bidang geser mengalami tegangan tarik, dengan *dowel action* yang dianggap tidak signifikan.
3. Baja tulangan harus memiliki panjang penjangkaran yang cukup pada kedua bidang hingga memungkinkan terjadinya leleh.
4. Kekuatan kohesi diabaikan pada teori *shear friction*.

### 3. Hermansen and Cowan (1974)

Dalam makalah ringkasnya, Hermansen and Cowan (1974), mengusulkan formula untuk menghitung kekuatan geser *ultimate* yang didasarkan pada hasil pengujian *push-off* oleh Anderson, Hofbeck et al., serta Hermansen, untuk *initially uncracked reinforced concrete* dalam Persamaan 2.8 sebagai berikut:

$$v_u = 4.0 + 0.8 \rho_v f_y \dots\dots\dots(2.8)$$

Persamaan di atas dibentuk dengan memperhitungkan kombinasi antara efek bekerjanya kohesi dan friksi pada bidang geser.



#### 4. Walraven et al. (1987)

Dalam penelitiannya, Walraven et al. (1987), mengemukakan fakta bahwa tidak ditemukannya variabel kuat tekan beton pada berbagai usulan persamaan kuat geser *interface* beton sebelumnya. Hal ini disebabkan karena rentang kuat tekan beton yang digunakan pada berbagai penelitian sebelumnya hanya berkisar antara 20 MPa sampai dengan 30 MPa sehingga pengaruh kuat tekan beton terhadap kuat geser *interface* beton menjadi tersamar.

Berdasarkan analisis statistik terhadap 88 benda uji *push-off* dengan rentang kuat tekan beton yang diperluas, diperoleh persamaan kekuatan *shear transfer* beton untuk kondisi *pre-cracked shear interface* sebagaimana Persamaan 2.9 dan Persamaan 2.10 berikut:

Dalam satuan MPa

$$v_u = C_1 (\rho_v f_y)^{C_2} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dalam satuan psi

$$v_u = C_3 (0.007 \rho_v f_y)^{C_4} \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana untuk satuan MPa

$$C_1 = 0.822 f'_{cc}{}^{0.406} \text{ dan } C_2 = 0.159 f'_{cc}{}^{0.303}$$

dimana untuk satuan psi

$$C_3 = 15.7 f'_{cc}{}^{0.406} \text{ dan } C_4 = 0.0355 f'_{cc}{}^{0.3}$$

Dengan  $f'_{cc}$  adalah kuat tekan beton berbentuk kubus dengan sisi 150 mm, dan  $f'_c = 0.85 f'_{cc}$ .

## 5. Mattock (1988)

Diskusi terhadap hasil penelitian Walraven, Frenay dan Puijssers (1987), disampaikan oleh Mattock (1988) yang mengusulkan persamaan kuat geser *interface* beton dengan memperhitungkan kekuatan tekan beton, dalam bentuk Persamaan 2.11 dan Persamaan 2.12 berikut:

Dalam satuan MPa

$$v_u = 0.467 f'_c {}^{0.545} + 0.8 (\rho_v f_y + \sigma_n) \leq 0.3 f'_c \dots \dots \dots (2.11)$$

Dalam satuan psi

$$v_u = 4.5 f'_c {}^{0.545} + 0.8 (\rho_v f_y + \sigma_n) \leq 0.3 f'_c \dots \dots \dots (2.12)$$

Mattock menyimpulkan bahwa ketahanan gaya geser beton yang ditunjukkan pada suku pertama memang merepresentasikan pengaruh kekuatan beton, sedangkan ketahanan geser yang ditunjukkan pada suku kedua tidak seharusnya melibatkan kuat tekan beton.

## 6. Mau and Hsu (1988)

Diskusi lain terhadap hasil penelitian Walraven, Frenay dan Puijssers (1987), juga disampaikan oleh Mau and Hsu (1988) yang menyarankan indeks non-dimensional tulangan,  $\rho_v f_y / f'_c$  sebagai faktor yang dominan untuk menentukan kuat geser *interface* beton. Berdasarkan analisis statistik diusulkan persamaan kuat geser sebagaimana Persamaan 2.13 berikut:

$$\frac{v_u}{f'_c} = 0.66 \sqrt{\frac{\rho_v f_y}{f'_c}} < 0.3 \dots \dots \dots (2.13)$$

Persamaan ini dapat digunakan untuk kasus *initially cracked* maupun kasus *initially uncracked shear interface*.

## 7. Tsoukantas and Tassios (1989)

Dalam makalahnya, Tsoukantas and Tassios (1989), mengusulkan persamaan kuat geser sebagaimana Persamaan 2.14 dan Persamaan 2.15 berikut:

Untuk permukaan *substrate* yang halus:

$$v_u = 0.4\sigma \dots\dots\dots(2.14)$$

Untuk permukaan *substrate* yang kasar:

$$v_u = 0.5\sqrt[3]{f'_c} \sigma \dots\dots\dots(2.15)$$

Persamaan tersebut di atas disusun berdasarkan pengujian yang dilakukan untuk menentukan kuat geser *interface* pada kasus elemen beton pracetak.

## 8. Loov and Patnaik (1994)

Dalam makalahnya, Loov and Patnaik (1994), mengusulkan persamaan kuat geser *interface* yang dikasarkan pada kasus elemen beton pracetak sebagaimana Persamaan 2.16 dan Persamaan 2.17 berikut:

Dalam satuan MPa

$$v_n = k\sqrt{(0.1 + \rho_v f_y) f'_c} \leq 0.25f'_c \dots\dots\dots(2.16)$$

Dalam satuan psi

$$v_n = k\sqrt{(15 + \rho_v f_y) f'_c} \leq 0.25f'_c \dots\dots\dots(2.17)$$

Nilai *k* yang disarankan adalah 0.5 untuk konstruksi beton komposit dan 0.6 untuk konstruksi beton monolith.

## 9. Kahn and Mitchell (2002)

Dalam penelitiannya, Kahn and Mitchell (2002), mengusulkan persamaan kuat geser *interface* yang didasarkan pada kasus beton mutu tinggi sebagaimana Persamaan 2.18 berikut:

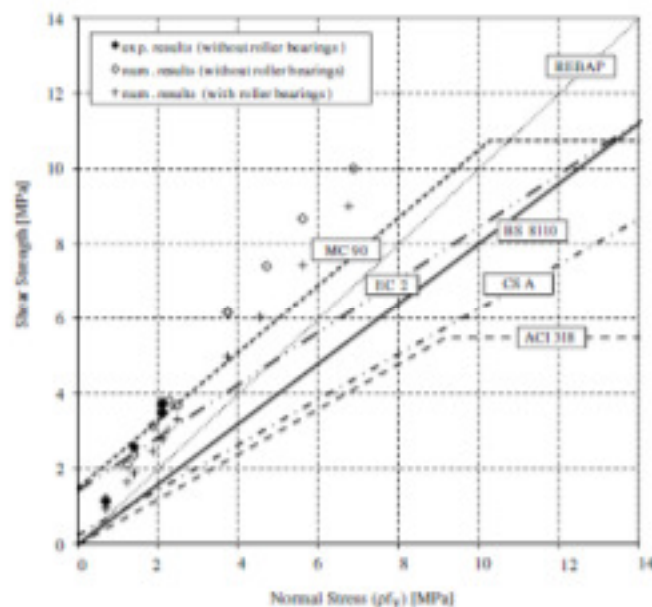
Dalam satuan psi

$$v_u = 0.05f'_c + 1.4\rho_v f_y \leq 0.2f'_c \dots \dots \dots (2.18)$$

Dengan batasan nilai  $f_y$  tidak melampaui 60 ksi ( $\pm 413.7$  MPa).

## 10. Akurasi Persamaan dalam Peraturan Perencanaan Beton

Julio et al. (2010), memberikan pendapat bahwa bekerjanya tekanan dalam arah tegak lurus bidang geser akan meningkatkan kekuatan geser *interface* beton secara proporsional sebagaimana terlihat pada Gambar di 2.53.



Gambar 2.53 Hubungan Kekuatan Geser *Interface* Beton dan Tekanan Aksial (Julio et al., 2010)

Hasil penelitian tersebut juga menunjukkan adanya perbedaan hasil prediksi kuat lekat *interface* beton normal yang dihitung dengan berbagai peraturan perencanaan beton bertulang (ACI 318, BS 8110, CSA, EC 2, dan MC 90) bila dibandingkan dengan hasil pengujian. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, dapat disimpulkan perlunya perbaikan akurasi persamaan yang telah dicantumkan dalam berbagai peraturan perencanaan beton bertulang.

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **III.1. Metode**

Sesuai dengan tujuannya, maka penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental. Data-data yang digunakan untuk analisis lebih lanjut, berupa data primer yang diperoleh dari hasil pengukuran dalam eksperimen yang dilakukan.

#### **III.2. Tempat**

Pembuatan dan pengujian benda uji dilakukan di Laboratorium Bahan Bangunan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta.

#### **III.3. Tahapan Penelitian**

Penelitian ini dimaksudkan untuk menghasilkan beton ringan struktural dengan kekuatan tarik yang lebih baik dengan material utama breksi batu apung yang selanjutnya akan dikembangkan untuk panel pelat beton pracetak (*stay-in place precast panel*).

Penelitian ini akan dilakukan dalam 9 (sembilan) tahapan utama yaitu :

Tahap I : Pemeriksaan sifat bahan agregat kasar dan agregat halus.

Tahap II : Perhitungan rencana campuran (*mix design*).

Tahap III : Optimasi komposisi campuran adukan beton ringan agregat breksi batu apung dengan bahan tambah mineral  
0%, 3%, 6%, 9%, 12% berdasarkan berat semen.

Tahap IV : Optimasi komposisi campuran adukan beton dengan penambahan serat baja (*SF*) dan polypropylene (*PP*) dengan *volume fraction*: 0,1% PP : 0,5% SF; 0,1% PP : 1,0% SF; 0,1% PP : 1,5% SF; dan 0,1% PP : 2,0% SF.

Tahap V : Karakterisasi kuat tarik *interface*.

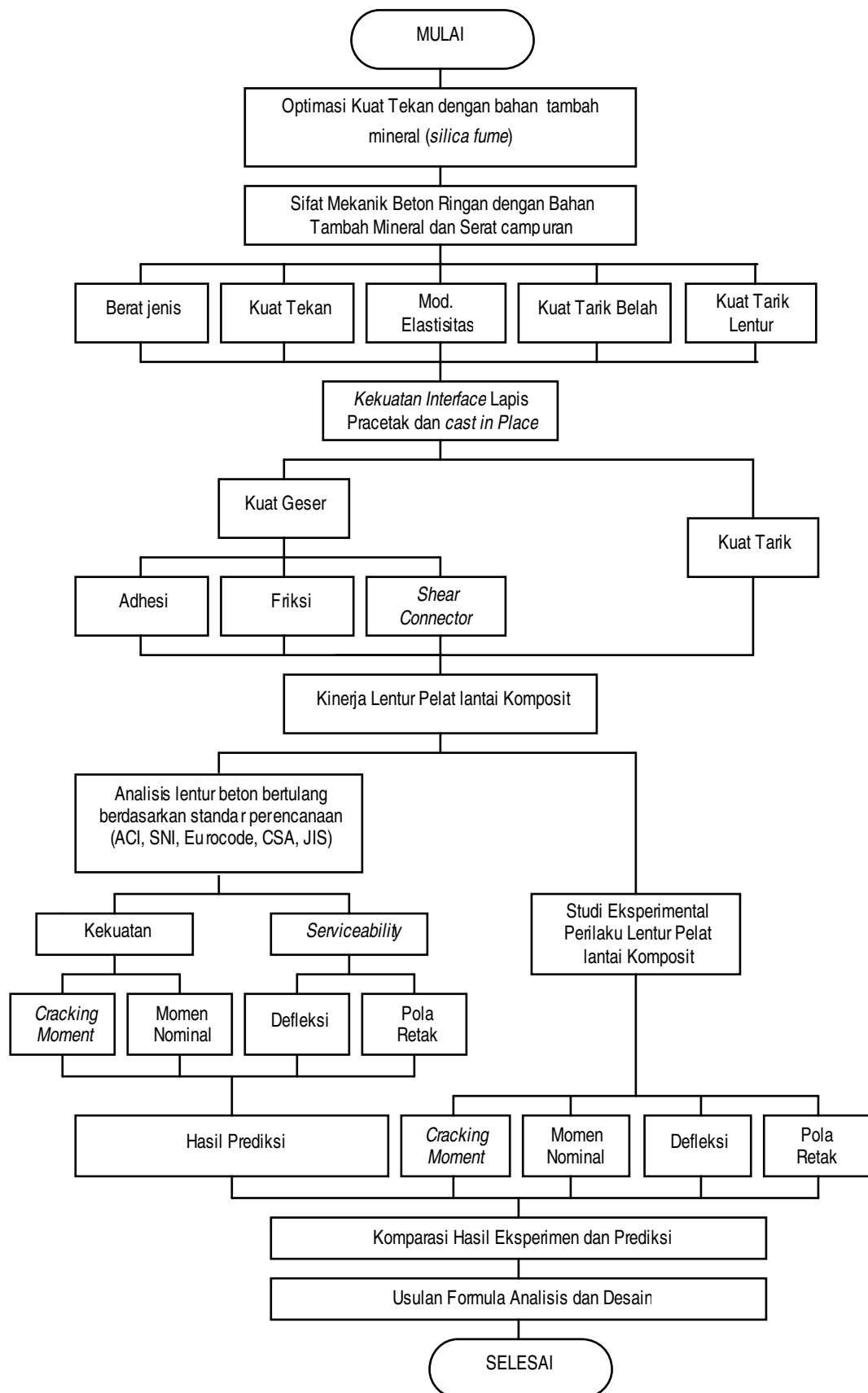
Tahap VI : Karakterisasi kuat geser *interface* melalui uji geser dengan kombinasi tegangan normal arah tegak lurus bidang normal. Komponen tegangan normal *pre-compression* arah tegak lurus bidang geser diberikan sebesar 5%, 10% dan 15% dari kekuatan tekan beton, varian tanpa pengaruh aksial ( $\sigma_n=0$ ), serta varian dengan *pre-tension* sebesar 25% dan 50% kekuatan tarik *interface*.

Tahap VII : Identifikasi kriteria kegagalan *dual-layer concrete interface*

Tahap VIII: Pengujian lentur slab *multi-layer concrete*

Tahap IX : Validasi dan Analisis

Secara garis besar, bagan alir proses penelitian dapat ditunjukkan pada Gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian Disertasi



### **III.4. Material**

Bahan-bahan yang dibutuhkan untuk melaksanakan berbagai pengujian dalam penelitian ini, meliputi :

1. Semen portland pozolan (PPC), yang memenuhi persyaratan SNI 15-0302-2004.
2. Agregat halus yang digunakan berupa agregat alami.
3. Agregat kasar yang digunakan berupa breksi batu apung dengan ukuran maksimum 19 mm, dari wilayah Bawuran, Kecamatan Pleret, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta.
4. Agregat kasar yang digunakan berupa batu pecah dengan ukuran maksimum 19 mm.
5. Air bersih.
6. Serat polypropylene monofilament dengan diameter 18  $\mu$ m dan panjang 12 mm.
7. Serat baja *end-hooked* berdiameter 0,7 mm dan panjang 40 mm.
8. Pozolan jenis Silica fume dan serbuk breksi batu apung.
9. *High Range Water Reducer*.

### **III.5. Metode Pengujian dan Analisis Data**

#### **III.5.1. Penelitian Pendahuluan (*Preliminary Research*)**

Tujuan dari penelitian pendahuluan ini adalah mendapatkan komposisi campuran adukan beton dengan agregat beton ringan yang memenuhi kriteria beton ringan struktural dan memiliki kuat tarik yang optimum. Adapun penelitian pendahuluan yang dilakukan meliputi:

#### **1. Pengujian Kuat Tekan Beton**

Pengujian kuat tekan beton ini dapat dibagi menjadi tiga tahapan penelitian, yaitu:

- a. Pada tahap pertama dilakukan *trial-mix* dengan memvariasikan fraksi agregat kasar breksi batu apung terhadap volume total agregat.
- b. Untuk tahap kedua, setelah diketahui fraksi agregat kasar breksi batu apung yang memenuhi kriteria beton ringan struktural, dilanjutkan dengan optimasi kuat tekan beton ringan dengan cara substitusi parsial semen dengan silica fume.
- c. Tahap ketiga, dilakukan pengujian kuat tekan beton dengan variasi penambahan campuran serat baja dan polypropylene. Dalam tahapan ini, *volume fraction* serat polypropylene ditetapkan sebesar 0,1% dari volume beton, sebagai nilai optimum yang didasarkan pada referensi dan penelitian yang dilakukan sebelumnya.

#### **a. Variabel Penelitian**

Variabel penelitian yang terkait dengan pengujian pada tahapan ini adalah:

- 1) Variabel bebas dalam pengujian ini adalah: a) tahap pertama: fraksi agregat kasar breksi batu apung terhadap volume total agregat, b) tahap kedua: persentase berat silica fume sebagai substitusi parsial terhadap berat semen, c) *volume fraction* serat baja dalam beton ringan berserat campuran.
- 2) Variabel terikat: kuat tekan dan berat isi beton.

#### **b. Sampel dan populasi**

Varian dan jumlah benda uji yang direncanakan dalam pengujian kuat tekan beton agregat breksi batu apung pada tahap pertama dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Matrix Pengujian Kuat Tekan Beton Agregat Breksi Batu Apung

Kode Benda Uji	Fraksi Breksi Pumice Terhadap Volume Agregat Total					Jumlah Benda Uji
	45%	55%	65%	75%	85%	
BA45						3
BA55						3
BA65						3
BA75						3
BA85						3
TOTAL						15

Varian dan jumlah benda uji yang direncanakan dalam pengujian kuat tekan beton agregat breksi batu apung pada tahap kedua dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Matrix Pengujian Kuat Tekan Beton Agregat Breksi Batu Apung dengan bahan Tambah Silica Fume

Kode Benda Uji	Persentase Substitusi Parsial Semen dengan Silica Fume					Jumlah Benda Uji
	0%	3%	6%	9%	12%	
SF0						3
SF3						3
SF6						3
SF9						3
SF12						3
TOTAL						15

Varian dan jumlah benda uji yang direncanakan dalam pengujian kuat tekan beton agregat breksi batu apung pada tahap ketiga dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Matrix Pengujian Kuat Tekan Beton Agregat Breksi Batu Apung dengan bahan Tambah Serat campuran

Kode Benda Uji	Fraksi Penambahan Serat Baja Terhadap Volume Beton					Jumlah Benda Uji
	0%	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	
SF0						3
SF3						3
SF6						3
SF9						3
SF12						3
TOTAL						15

### c. Peralatan

Instrumen yang diperlukan untuk pengukuran kuat tekan beton adalah *Compression Testing Machine*.

### d. Analisis Data

Kuat tekan beton adalah besarnya beban persatuan luas yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu, yang dihasilkan oleh mesin tekan. Peralatan yang digunakan meliputi cetakan silinder diameter 152 mm dan tinggi 305 mm, tongkat pemadat, dan mesin tekan.

Prosedur pengujian dilaksanakan berdasarkan SNI : 03-1974-1990, benda uji diletakkan pada mesin tekan secara sentris, dan mesin tekan dijalankan dengan penambahan beban antara 2 sampai 4 kg/cm<sup>2</sup> perdetik. Pembebanan dilakukan sampai benda uji menjadi hancur dan beban maksimum yang terjadi selama pemeriksaan benda uji dicatat. Kuat tekan beton dihitung berdasarkan besarnya beban persatuan luas, menurut Persamaan 3.1.

$$\text{Kuat Tekan} = \frac{P}{A} \text{ } \frac{N}{\text{mm}^2} \dots\dots\dots (3.1)$$

di mana ;      P    = beban maksimum (N)

                  A    = luas penampang benda uji (mm<sup>2</sup>)

## 3. Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

### a. Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang terkait dengan pengujian pada tahapan ini adalah:

- 1) Variabel bebas dalam pengujian ini adalah *volume fraction* serat baja dalam beton ringan berserat campuran.
- 2) Variabel terikat: kuat tarik belah beton.

## b. Sampel dan populasi

Varian dan jumlah benda uji yang direncanakan dalam pengujian kuat tarik belah beton agregat breksi batu apung dengan bahan tambah serat campuran dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Matrix Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Agregat Breksi Batu Apung dengan bahan Tambah Serat campuran

Kode Benda Uji	Fraksi Penambahan Serat Baja Terhadap Volume Beton					Jumlah Benda Uji
	0%	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	
SF0						3
SF3						3
SF6						3
SF9						3
SF12						3
TOTAL						15

## c. Peralatan

Instrumen yang diperlukan untuk pengukuran kuat tekan beton adalah *Compression Testing Machine*.

## d. Analisis Data

Metode yang digunakan adalah metode uji tarik belah yang mengacu pada ASTM C496-90, besaran kuat tarik belah benda uji dihitung dengan Persamaan 3.2.

$$\text{Kuat tarik} = \frac{2.P}{\pi l d} \text{ MPa} \dots\dots\dots (3.2)$$

di mana; P = beban maksimum (kN)  
l = panjang benda uji (mm)  
d = diameter benda uji (mm)

Benda uji yang digunakan berupa silinder dengan diameter 150 mm dengan tinggi 300 mm.

### 3. Pengujian Kuat Lentur Beton

#### a. Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang terkait dengan pengujian pada tahapan ini adalah:

- 1) Variabel bebas dalam pengujian ini adalah *volume fraction* serat baja dalam beton ringan berserat campuran.
- 2) Variabel terikat: kuat lentur beton.

#### b. Sampel dan populasi

Varian dan jumlah benda uji yang direncanakan dalam pengujian kuat lentur beton agregat breksi batu apung dengan bahan tambah serat campuran dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Matrix Pengujian Kuat Lentur Beton Agregat Breksi Batu Apung dengan bahan Tambah Serat campuran

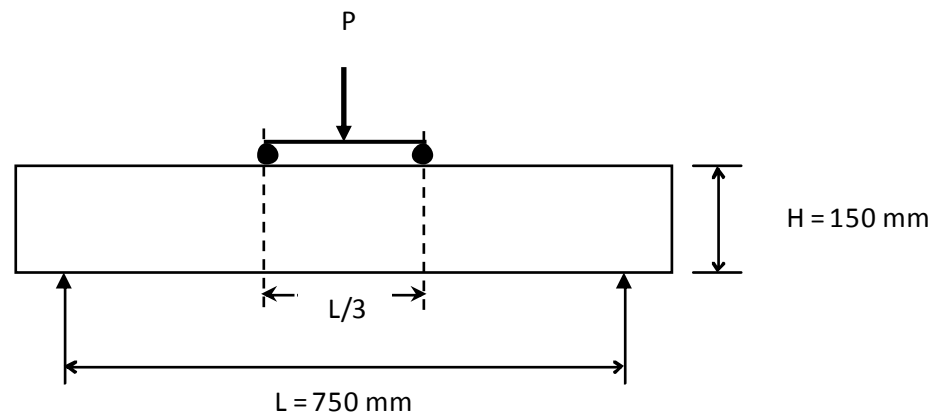
Kode Benda Uji	Fraksi Penambahan Serat Baja Terhadap Volume Beton					Jumlah Benda Uji
	0%	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	
SF0						3
SF3						3
SF6						3
SF9						3
SF12						3
TOTAL						15

#### c. Peralatan

Instrumen yang diperlukan untuk pengukuran kuat lentur beton adalah *Universal Testing Machine*.

#### d. Analisis Data

Cara pengujian yang digunakan adalah metode dua titik pembebanan yang mengacu pada standar SNI 03-4431-1997 pada Gambar 3.2, sedangkan besaran tegangan tarik (*modulus of rupture*) dihitung dengan Persamaan 3.3.



Gambar 3.2 Metode Pengujian Kuat Lentur Metode *Four Points Loading*

$$R = \frac{P.L}{bh^2} \text{ MPa} \dots\dots\dots (3.3)$$

- di mana;
- R = modulus rupture
  - P = beban maksimum (kN)
  - L = panjang benda uji (mm)
  - b = lebar penampang benda uji (mm)
  - h = tinggi penampang benda uji (mm)

Benda uji yang digunakan berupa balok dengan ukuran 150 mm x 150 mm x 750 mm.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

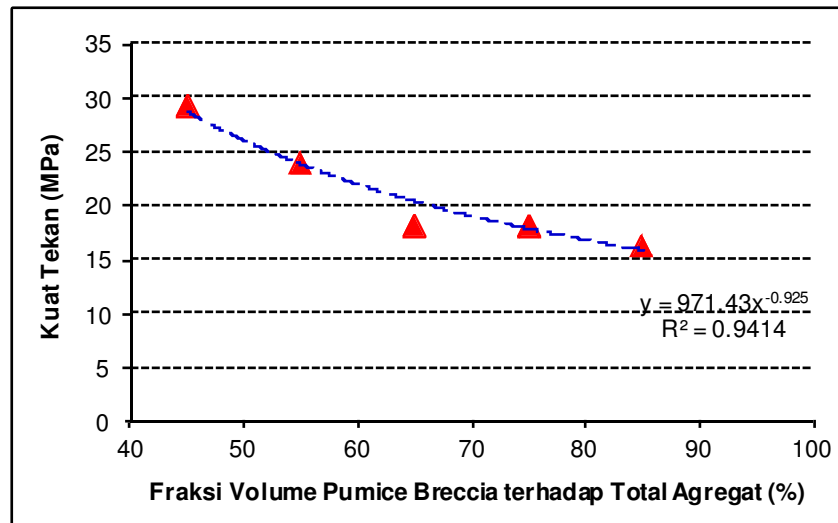
### IV.1. Sifat Fisik dan Mekanik Beton Ringan Agregat Breksi Pumice (*Lightweight Aggregate Concrete*)

Penelitian awal dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dan mekanik beton ringan yang akan digunakan sebagai panel beton pracetak (*stay in place formwork/ preslab/ half slab*). Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penggunaan breksi pumice sebagai agregat kasar dengan ukuran maksimum 20 mm, pada fraksi volume antara 55% sampai 75% dari total volume agregat dapat menghasilkan beton ringan struktural yang dipersyaratkan SNI 03-2847 2000, yang memberi batasan berat jenis maksimum  $1900 \text{ kg/m}^3$  dan kuat tekan minimum 17 MPa (ACI-213, 2003). Hasil ini ditunjukkan pada Tabel 4.1, Gambar 4.1, dan Gambar 4.2.

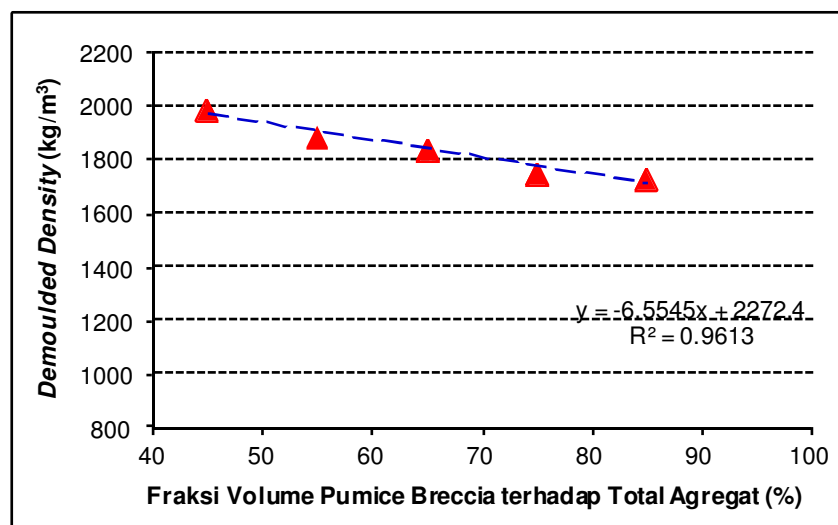
Tabel 4.1 Hubungan antara *Volume Fraction* Agregat Kasar (Breksi Pumice) dengan Berat Jenis dan Kuat Tekan Beton

<b><i>Volume Fraction</i> Agregat Kasar (Breksi Pumice) terhadap Volume Agregat Keseluruhan (%)</b>	<b><i>Demoulded Density</i> (<math>\text{kg/m}^3</math>)</b>	<b>Kuat Tekan (MPa)</b>
45	1995.146	29.514
55	1897.910	24.198
65	1845.090	18.424
75	1755.056	18.376
85	1738.850	16.476





Gambar 4.1 Hubungan antara *Volume Fraction* Agregat Kasar dengan Kuat Tekan Beton

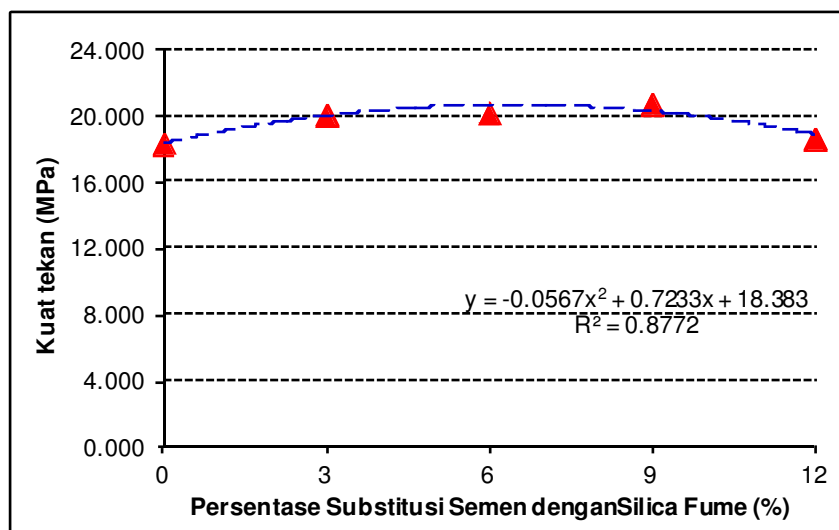


Gambar 4.2 Hubungan antara *Volume Fraction* Agregat Kasar dengan Berat Jenis Beton

Selanjutnya, untuk meningkatkan kuat tekan beton juga telah dilakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh substitusi sebagian semen (berdasarkan berat) dengan silica fume terhadap kuat tekan beton. Hasil penelitian berkaitan dengan efek penggunaan silica fume terhadap kuat tekan beton dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.3.

Tabel 4.2 Hubungan antara Persentase Substitusi sebagian Semen dengan Silica Fume Terhadap Berat Jenis dan Kuat Tekan Beton

Substitusi Sebagian Berat Semen dengan Silica Fume (%)	<i>Demoulded Density</i> (kg/m <sup>3</sup> )	Kuat Tekan (MPa)
0	1845.090	18.424
3	1824.682	20.110
6	1851.092	20.228
9	1861.896	20.832
12	1854.093	18.701



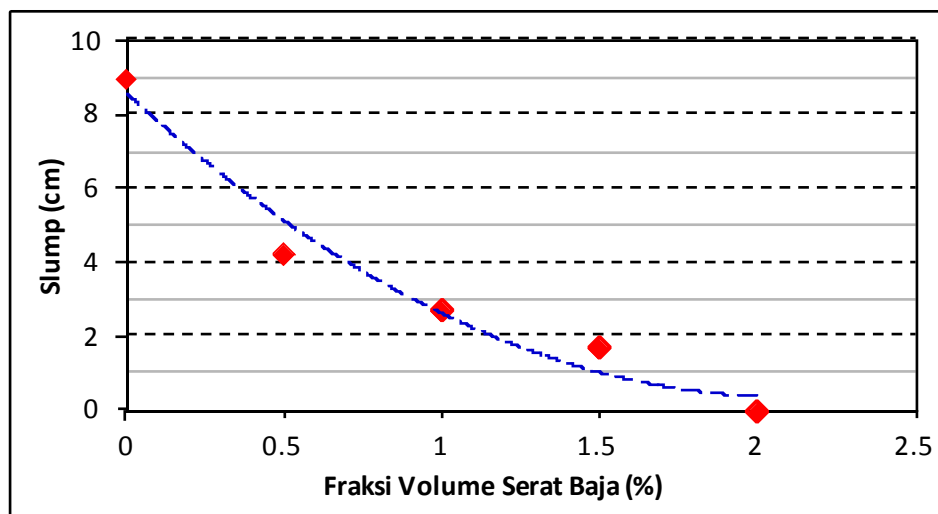
Gambar 4.3 Efek Substitusi Sebagian Semen dengan Silica Fume Terhadap Kuat Tekan Beton

Hasil penelitian di atas menunjukkan bahwa substitusi sebagian semen PPC dengan silica fume sebesar 9% dari berat semen akan memberikan peningkatan yang optimum terhadap kuat tekan beton ringan. Kuat tekan beton ringan berumur 56 hari dengan substitusi 9% berat semen PPC dengan silica fume dapat meningkat sebesar 13% dibandingkan dengan beton ringan yang tidak menggunakan silica fume.

#### IV.2. Sifat Fisik dan Mekanik Beton Ringan Agregat Breksi Pumice dengan Serat Campuran (*Hybrid fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete*)

Dalam penelitian ini, pengaruh penambahan serat campuran antara polypropylene dengan serat baja terhadap tingkat kelecakan beton diukur dengan *slump-test method* berdasarkan ASTM C-143.

Perubahan nilai *slump* beton dapat dilihat pada Gambar 4.4, dimana nilai *slump* beton cenderung mengalami penurunan seiring dengan penambahan fraksi volume serat. Penurunan kelecakan beton ini diakibatkan karena penambahan serat mengakibatkan terjadinya *blocking effect* yang menghambat pergerakan beton segar serta berkurangnya air bebas yang dapat difungsikan untuk melumasi beton segar.



Gambar 4.4 Pengaruh Penambahan Serat Terhadap Nilai Slump Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat Polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja

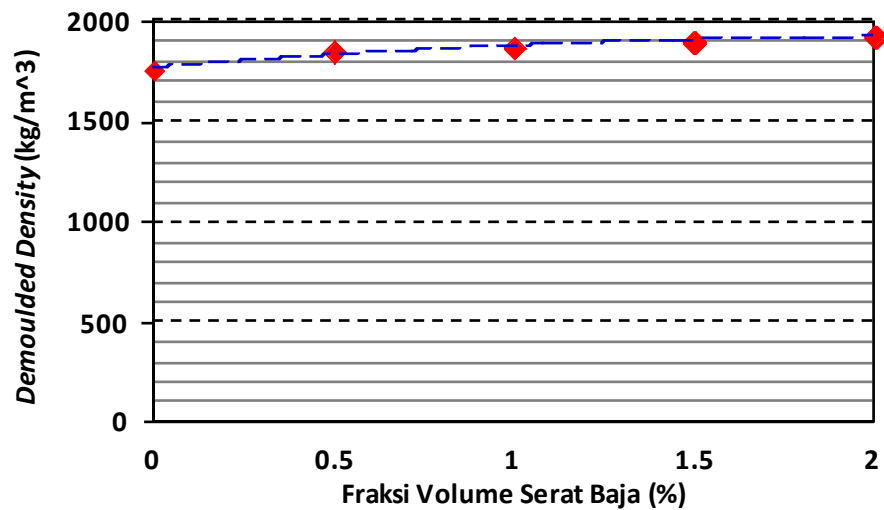
Evaluasi sifat mekanik beton ringan dengan penambahan serat polypropylene dan serat baja dilakukan dengan pengujian kuat tekan, modulus elastisitas, kuat tarik belah, dan kuat lentur beton pada umur 56 hari. Hasil pengujian sifat mekanik beton dapat dilihat secara rinci pada Tabel 4.3.

Table 4.3 Pengaruh Penambahan Serat Terhadap Sifat Mekanik Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat Polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja

Fraksi Volume Serat Baja (%)	<i>Demoulded Density</i> (kg/m <sup>3</sup> )	Kuat Tekan (MPa)	Modulus Elastisitas (MPa)	Kuat Tarik Belah (MPa)	Kuat Lentur (MPa)
0.0	1764.783	16.445	7317.496	1.239	2.782
0.5	1857.325	19.149	9125.917	2.565	4.449
1.0	1874.057	20.135	8191.957	3.058	7.155
1.5	1902.088	19.707	7492.722	3.993	7.997
2.0	1932.855	18.560	6836.531	3.763	7.979

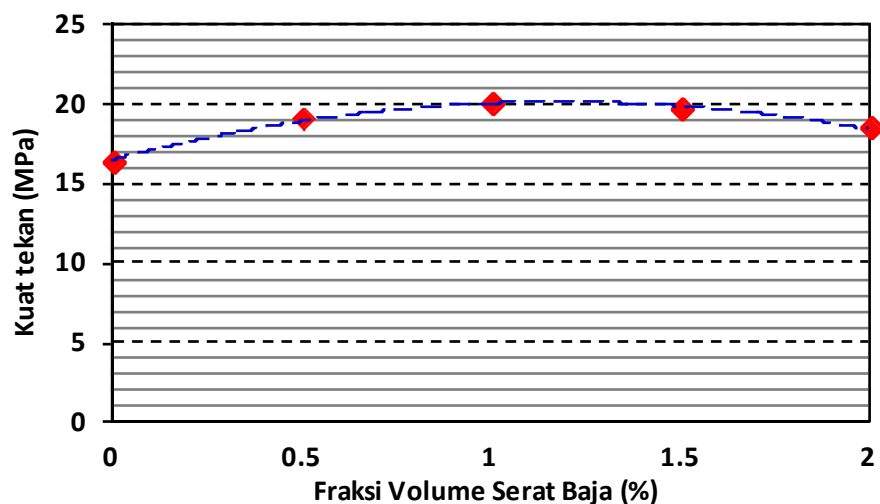
Penambahan serat campuran polypropylene dengan serat baja mengakibatkan bertambahnya *demoulded density* beton ringan seperti terlihat pada Gambar 4.5. Peningkatan *demoulded density* beton ringan ini diakibatkan karena penambahan serat baja yang memiliki berat jenis yang lebih besar jika dibandingkan dengan berat jenis beton, peningkatan berat jenis ini sesuai dengan prediksi dalam proses perhitungan rancang campur beton.

Meskipun ditengarai terjadinya peningkatan *demoulded density* sebagai akibat penambahan serat ke dalam campuran beton ringan, namun berdasarkan hasil perhitungan pada saat rancang campur beton dan hasil penimbangan benda uji dapat diketahui bahwa berat jenis beton yang dihasilkan masih memenuhi syarat untuk diklasifikasikan sebagai beton ringan pada saat dilakukan penambahan serat campuran yang mengkombinasikan 0,1% serat polypropylene dengan 1,5% serat baja.



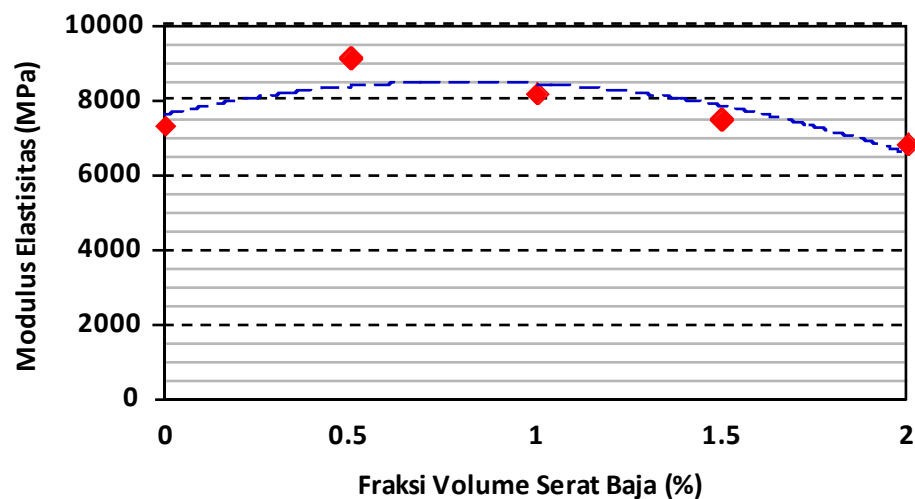
Gambar 4.5 Pengaruh Penambahan Serat Terhadap *Demoulded Density* Beton dengan Campuran 0.1% Serat Polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja

Hasil uji tekan yang disajikan pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa penambahan serat campuran polypropylene dengan serat baja dapat meningkatkan kuat tekan beton hingga 22,44% pada saat dicapai komposisi optimum, yaitu campuran 0,1% serat polypropylene dengan 1,0% serat baja.



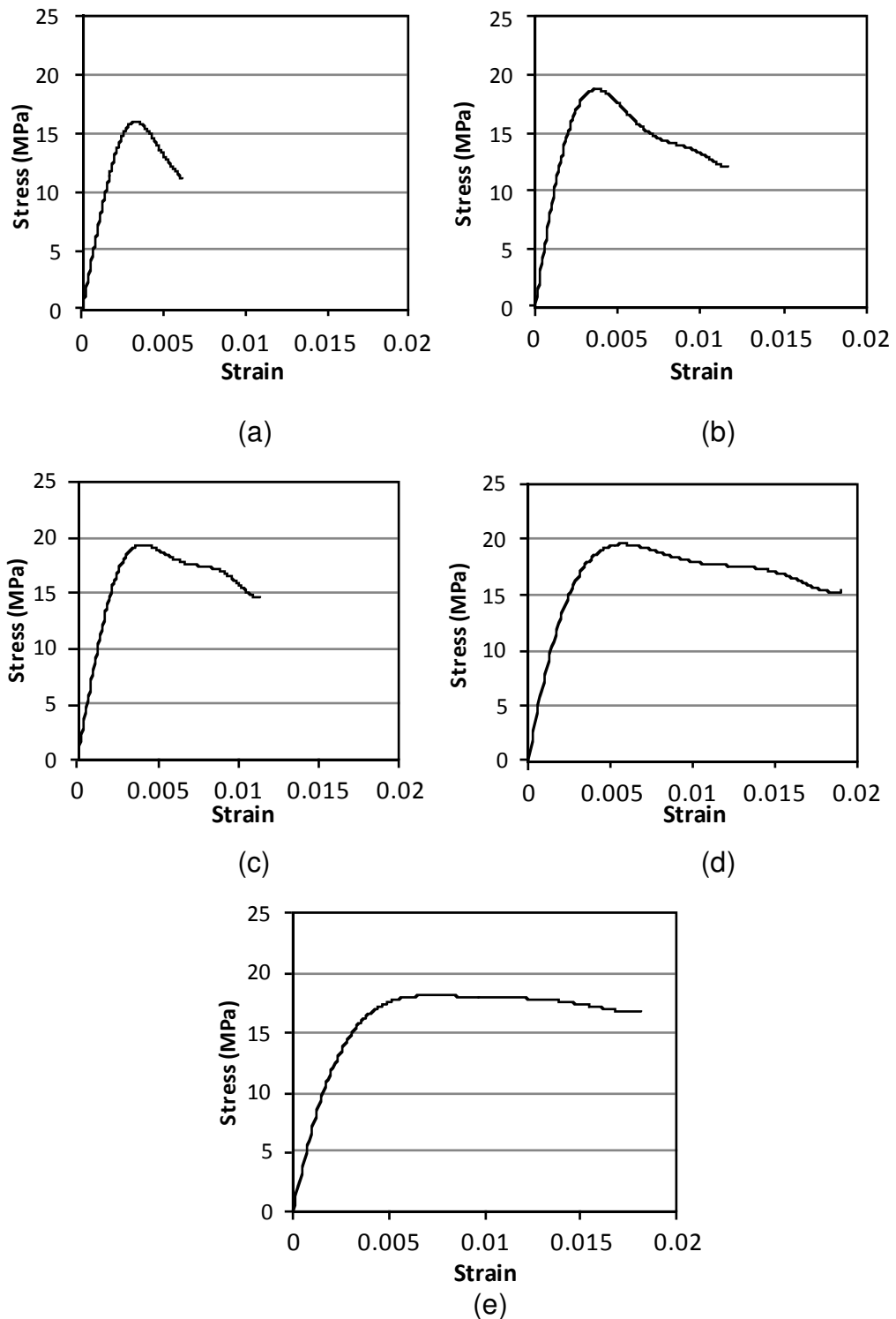
Gambar 4.6 Pengaruh Penambahan Serat Terhadap Kuat Tekan Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat Polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja

Hasil pengujian modulus elastisitas beton yang dilakukan bersamaan dengan pelaksanaan uji tekan yang disajikan pada Gambar 4.7 menunjukkan bahwa penambahan serat campuran polypropylene dengan serat baja dapat meningkatkan modulus elastisitas beton hingga dicapai komposisi optimum dengan penambahan serat campuran 0,1% serat polypropylene dengan 0,5% serat baja. Kendatipun demikian, dapat diketahui bahwa semua varian beton ringan dengan penambahan serat campuran memiliki nilai modulus elastisitas yang lebih besar jika dibandingkan dengan beton ringan tanpa serat baja.



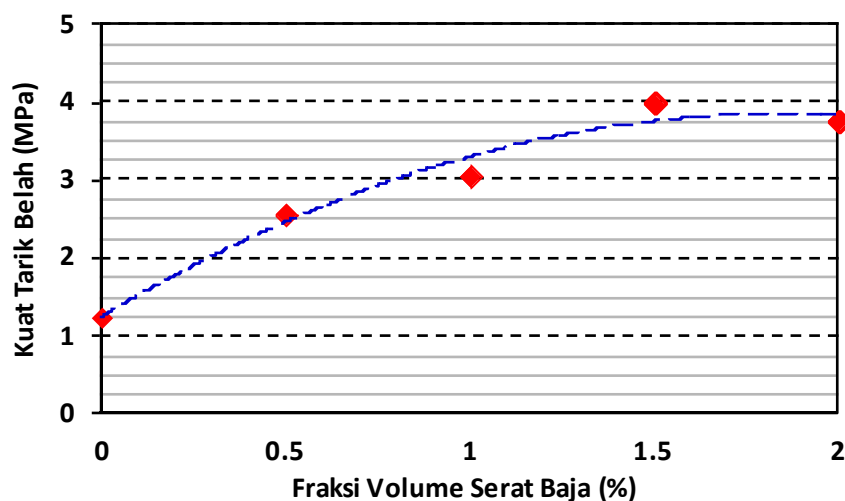
Gambar 4.7 Pengaruh Penambahan Serat Terhadap Nilai Modulus Elastisitas Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat Polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja

Hubungan tegangan-regangan (*stress-strain*) yang dihasilkan pada uji tekan beton dapat dilihat pada Gambar 4.8. Berdasarkan grafik hubungan tegangan-regangan tersebut dapat diketahui bahwa beton ringan dengan penambahan serat campuran polypropylene dengan serat baja memiliki perilaku tahanan pasca beban maksimum yang lebih baik jika dibandingkan dengan beton ringan tanpa serat baja sehingga tidak terjadi pola keruntuhan mendadak. Peningkatan ketahanan beton pasca beban maksimum dapat terjadi karena adanya kontribusi serat baja dalam mekanisme penyerapan energi yang ditandai fenomena *bridging action* dengan terjadinya distribusi retak dalam proses pembebanan, sedangkan serat polypropylene memberikan kontribusi untuk meningkatkan kuat lekat serat baja dan menghambat terjadinya keruntuhan secara mendadak.



Gambar 4.8 Hubungan Tegangan-Regangan (*Stress-Strain*) pada Uji Tekan Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat Polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja (a) 0.0% SF, (b) 0.5% SF, (c) 1.0% SF, (d) 1.5% SF dan (e) 2.0% SF

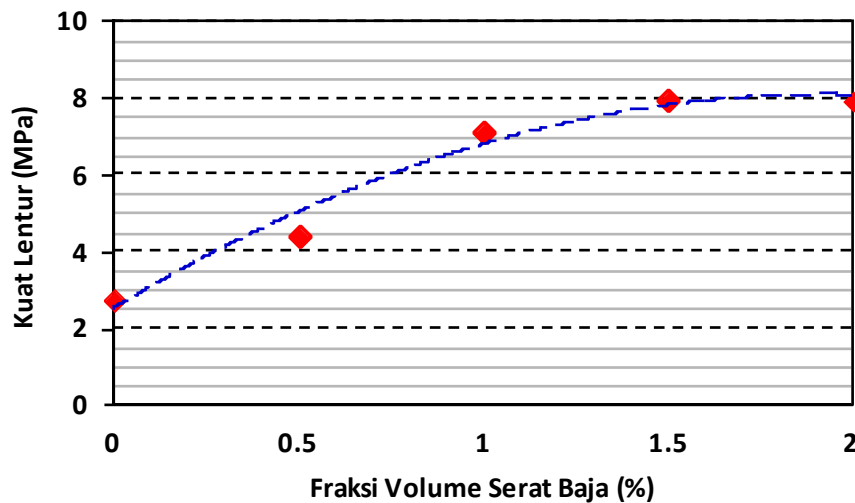
Hasil uji tarik belah yang disajikan pada Gambar 4.9 menunjukkan bahwa penambahan serat campuran polypropylene dengan serat baja dapat meningkatkan kuat tarik belah beton hingga 222,28% pada saat dicapai komposisi optimum, yaitu campuran 0,1% serat polypropylene dengan 1,5% serat baja.



Gambar 4.9 Pengaruh Penambahan Serat Terhadap Kuat Tarik Belah Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat Polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja

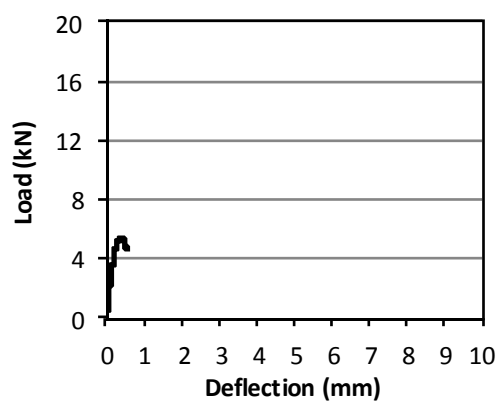
Hasil uji lentur beton yang disajikan pada Gambar 4.10 menunjukkan bahwa penambahan serat campuran polypropylene dengan serat baja dapat meningkatkan kuat lentur beton ringan hingga 187,46% pada saat dicapai komposisi optimum, yaitu campuran 0,1% serat polypropylene dengan 1,5% serat baja.



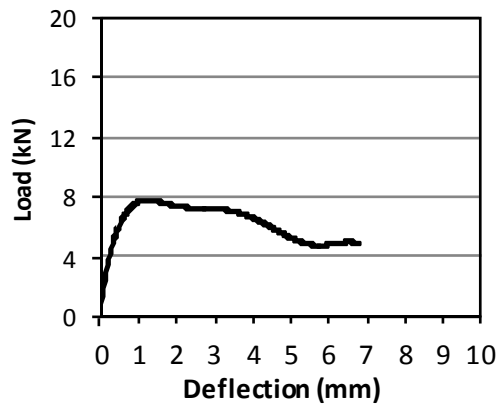


Gambar 4.10 Pengaruh Penambahan Serat Terhadap Kuat Tarik Lentur Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat Polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja

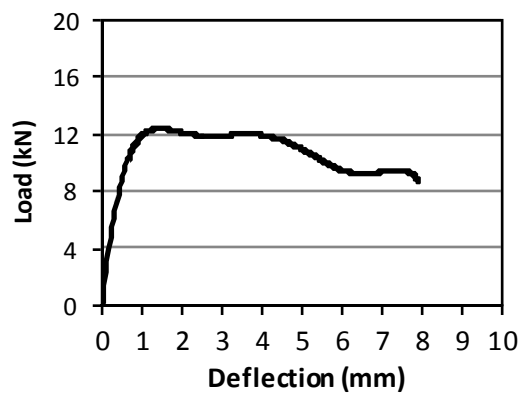
Hubungan beban-lendutan (*load-deflection*) yang dihasilkan pada uji lentur beton dapat dilihat pada Gambar 4.11. Berdasarkan grafik hubungan beban-lendutan tersebut dapat diketahui bahwa beton ringan dengan penambahan serat campuran polypropylene dengan serat baja memiliki perilaku tahanan pasca beban nemtur maksimum yang lebih baik jika dibandingkan dengan beton ringan tanpa serat baja sehingga tidak terjadi pola keruntuhan mendadak akibat bekerjanya momen lentur. Peningkatan ketahanan beton pasca beban lentur maksimum dapat terjadi karena adanya kontribusi serat baja dalam mekanisme penyerapan energi yang ditandai fenomena *bridging action* dengan terjadinya distribusi retak dalam proses pembebanan, sedangkan serat polypropylene memberikan kontribusi untuk meningkatkan kuat lekat serat baja dan menghambat terjadinya keruntuhan lentur secara mendadak.



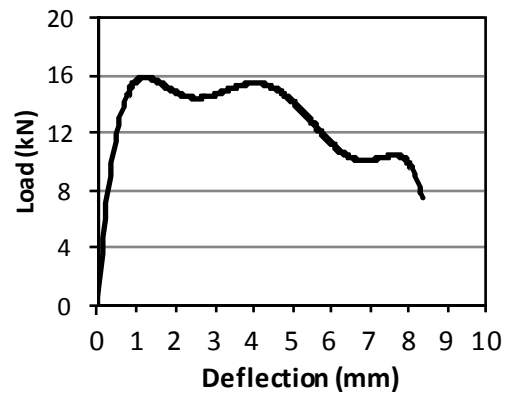
(a)



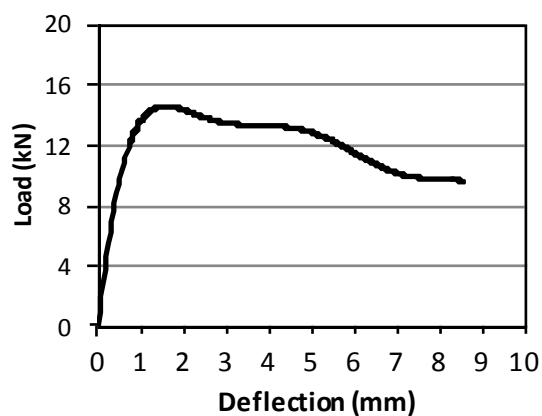
(b)



(c)



(d)

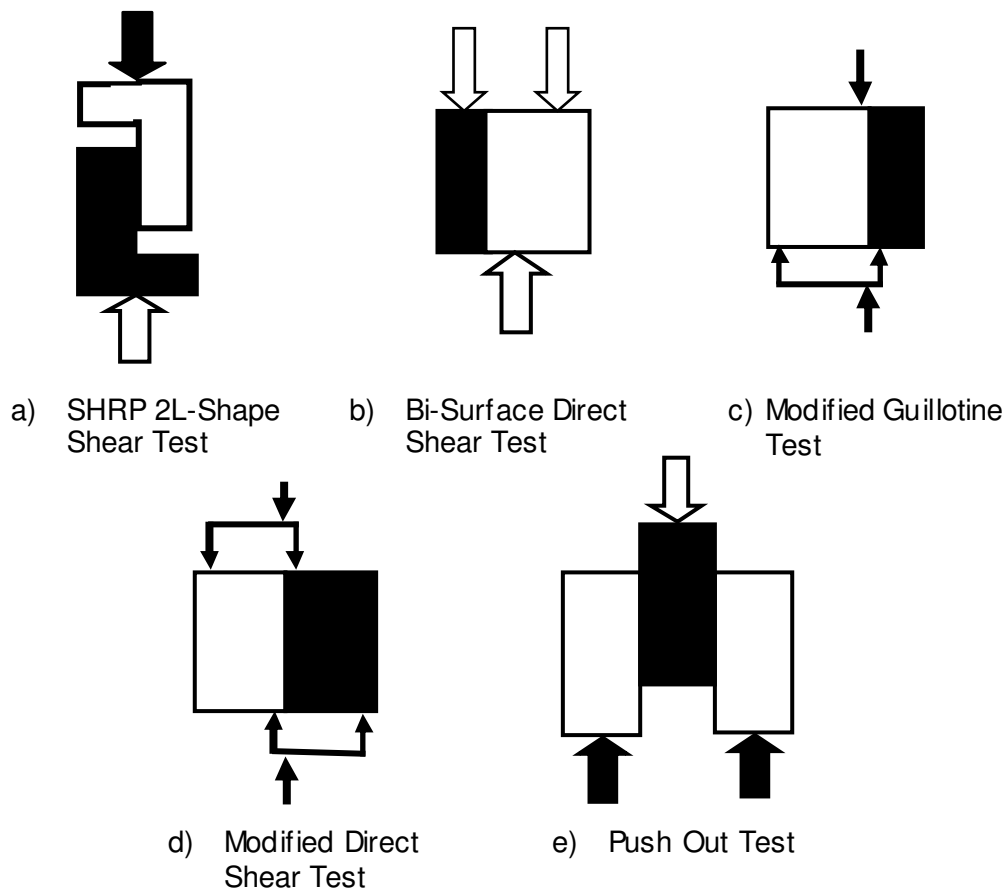


(e)

Gambar 4.11 Hubungan Beban-Lendutan (*Load-deflection*) pada Uji Lentur Beton Ringan dengan Campuran 0.1% Serat Polypropylene dan Berbagai Fraksi volume Serat Baja (a) 0.0% SF, (b) 0.5% SF, (c) 1.0% SF, (d) 1.5% SF dan (e) 2.0% SF

### IV.3. Modifikasi Metode Pengujian Kuat lekat *Interface* Beton Lama dan Beton Baru

Metode pengujian eksperimental terhadap kuat geser pada daerah sambungan antara beton lama dengan beton baru telah dikembangkan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Bentuk benda uji dan cara pembebanan dari metode-metode yang pernah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 4.12.



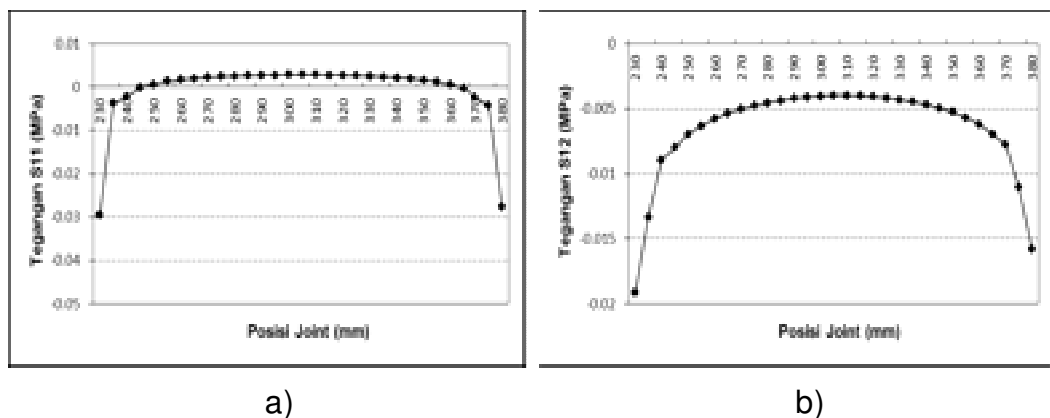
Gambar 4.12 Skema Kerja Berbagai Teknik Pengujian Kuat Geser Beton Lama dengan Beton Baru

Kajian pustaka yang telah dilakukan menemukan sedikitnya ada 5 (lima) model uji fisik yang telah dikembangkan. Model uji fisik tersebut adalah:

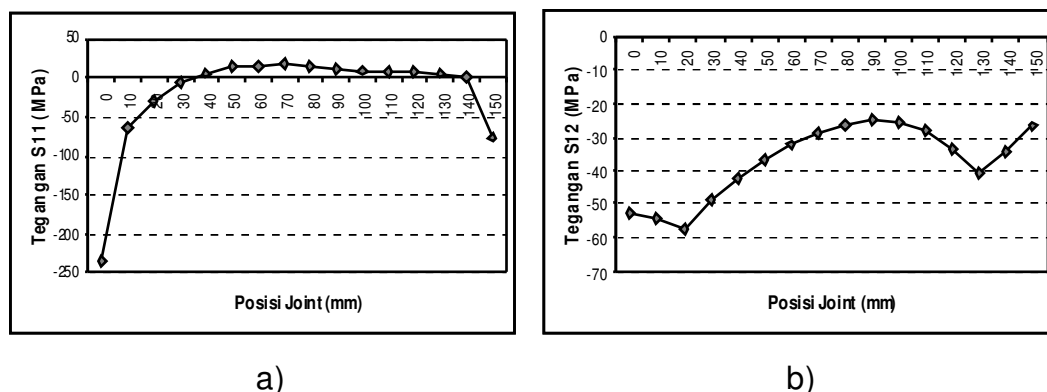
1. *SHRP Dual L-Shape Test*: dikembangkan oleh *Strategic Highway Research Program* pada tahun 1993, terdiri atas dua *L-shaped segment* berdimensi 15x12x6 inchi. (Gillum et al., 2001).
2. *Bi-surface Shear Test*: dimensi benda uji 150x150x150 mm, tebal lapis *substrate* 100 mm, lapis *overlay* 50 mm, menggunakan 3 (tiga) tumpuan plat baja dengan lebar tumpuan masing-masing 50 mm, yang dipasang simetris dengan acuan posisi bidang geser (Momayez et al., 2005).
3. *Modified Guillotine Test*: dimensi benda uji 150x150x115 mm, tebal *substrate* 75 mm, lapis *overlay* 40 mm, digunakan 3 (tiga) tumpuan plat baja, dua di antaranya dipasang pada posisi bidang geser (Beushausen and Alexander, 2008).
4. *Modified FIP Direct Shear Test*: dimensi benda uji 150x150x150 mm, tebal lapis *substrate* 75 mm, lapis *overlay* 75 mm, menggunakan 4 (empat) tumpuan plat baja, dipasang simetris terhadap posisi bidang geser (Beushausen and Alexander, 2008).
5. *Push-Out Test*: terdiri atas tiga segment balok berukuran 150x150x300 mm, dua lapis *substrate* masing-masing berada di bagian tepi, dan satu segment lapis *overlay* dicor diantara kedua lapis *substrate* dengan selisih ketinggian 50 mm (Qian et al., 2009).

Untuk mendapatkan metode pengujian yang lebih representatif dalam menggambarkan kuat geser beton lama dan beton baru, maka dilakukan analisis distribusi tegangan pada masing-masing metode pengujian. Analisis tegangan pada metode pengujian *SHRP Dual L-Shape Test*, dan *Push-Out Test* dilakukan dengan anggapan beban bekerja secara merata di sepanjang bidang tumpuan. *Bi-surface Shear Test* dianalisis dengan asumsi beban yang bekerja berupa deformasi yang terjadi merata pada salah satu sisi bidang tumpuan. Sedangkan untuk metode *Modified Guillotine Test* dan *Modified FIP Direct Shear Test*, dilakukan analisis dengan beban titik yang ditempatkan dengan memperhatikan posisi resultan gaya agar dipenuhi prinsip keseimbangan.

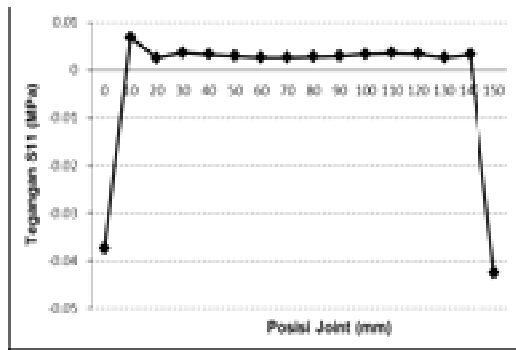
Analisis tegangan dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan elemen segi empat dengan SAP 2000. Profil distribusi tegangan geser dan normal pada bidang uji geser untuk masing-masing metode telah dianalisis dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4.13 (*2L shape*), Gambar 4.14 (*Bi-Surface Shear*), Gambar 4.15 (*Modified Guillotine*), Gambar 4.16 (*Modified FIP Direct Shear Test*) dan Gambar 4.17 (*Push Out test*).



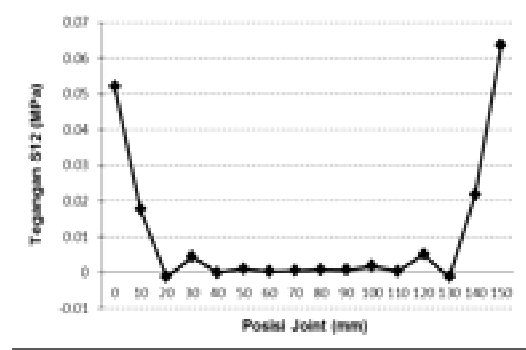
Gambar 4.13 Profil Distribusi Tegangan a) Normal Tegak Lurus Bidang Normal (S11) dan b) Tegangan Geser SHRP *2L-Shape Shear Test* (Gillum et al., 2001)



Gambar 4.14 Profil Distribusi Tegangan a) Normal Tegak Lurus Bidang Normal (S11) dan b) Tegangan Geser *Bi-surface Shear Test* (Momayez et al., 2005)

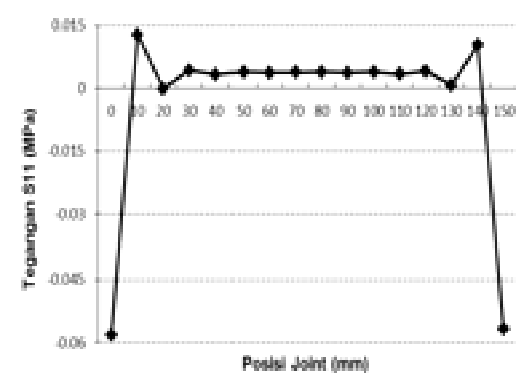


a)

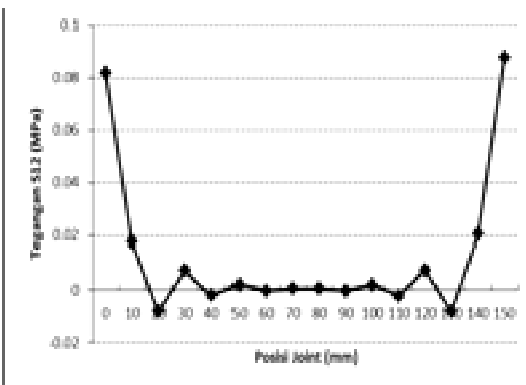


b)

Gambar 4.15 Profil Distribusi Tegangan a) Normal Tegak Lurus Bidang Normal (S11) dan b) Tegangan Geser *Modified Guillotine Test* (Beushausen and Alexander, 2008)

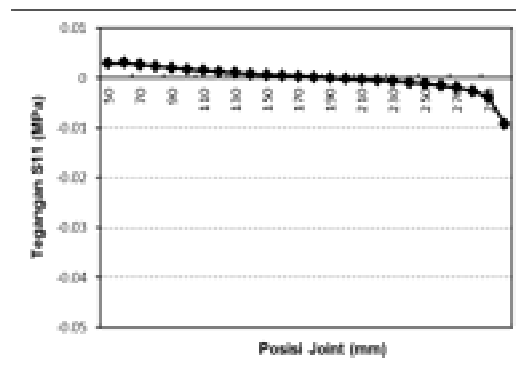


a)

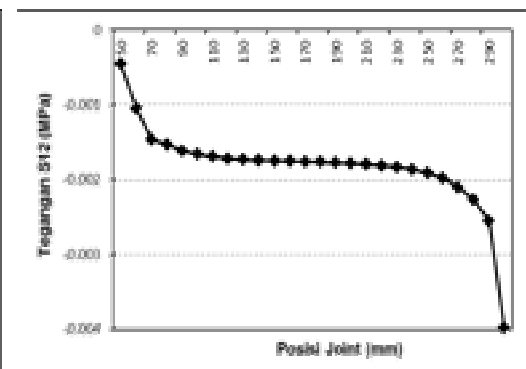


b)

Gambar 4.16 Profil Distribusi Tegangan a) Normal Tegak Lurus Bidang Normal (S11) dan b) Tegangan Geser *Modified FIP Direct Shear Test* (Beushausen and Alexander, 2008)



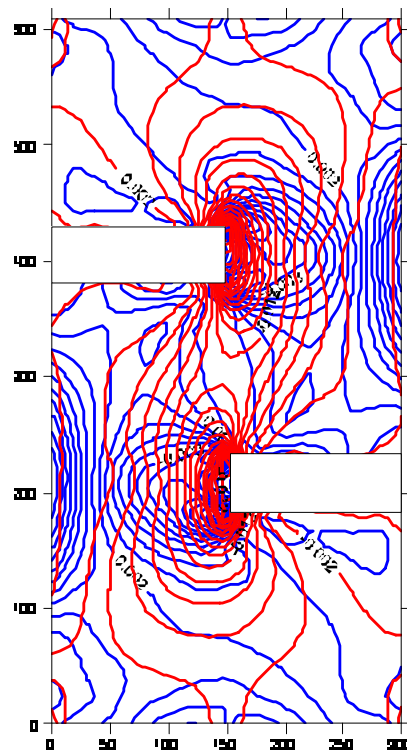
a)



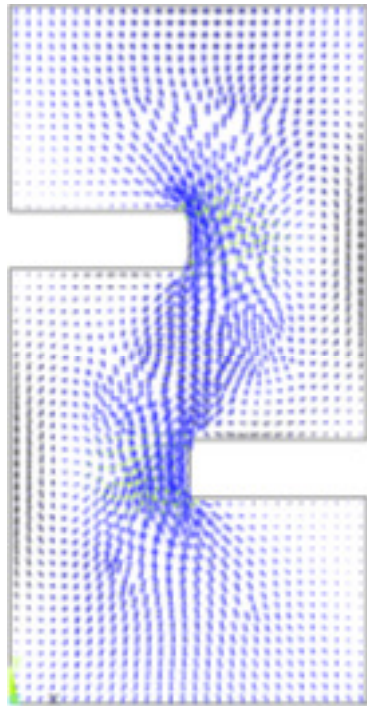
b)

Gambar 4.17 Profil Distribusi Tegangan a) Normal Tegak Lurus Bidang Normal (S11) dan b) Tegangan Geser *Push Out Test* (Qian et al., 2009)

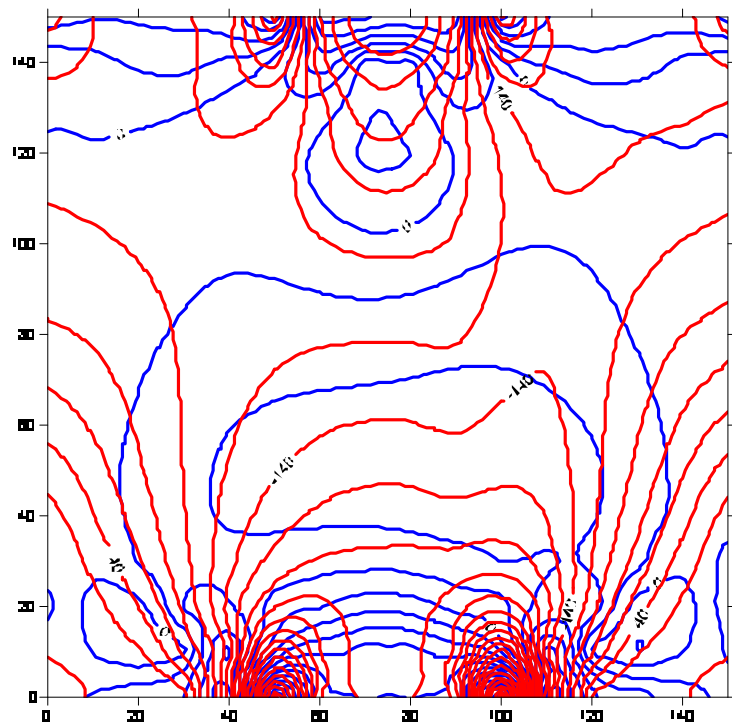
Visualisasi hasil analisis tegangan utama (*principal stress*) pada masing-masing metode pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19 (*2L shape*), Gambar 4.20 dan Gambar 4.21 (*Bi-Surface Shear*), Gambar 4.22 dan Gambar 4.23 (*Modified Guillotine*), Gambar 4.24 dan Gambar 4.25 (*Modified FIP Direct Shear Test*) serta Gambar 4.26 dan Gambar 4.27 (*Push Out test*).



Gambar 4.18 Kontur Tegangan Utama pada SHRP *Dual L-Shape Test* (Gillum et al., 2001)

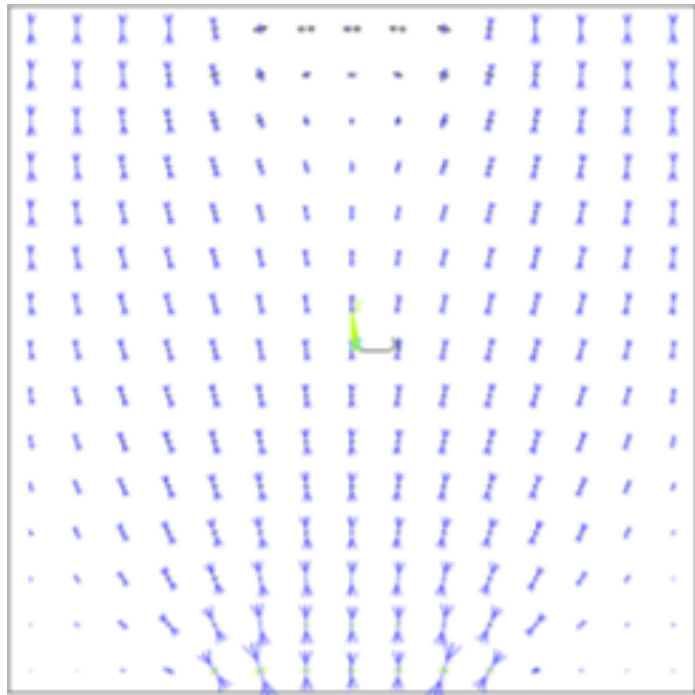


Gambar 4.19 Vektor Tegangan Utama pada SHRP *Dual L-Shape Test* (Gillum et al., 2001)

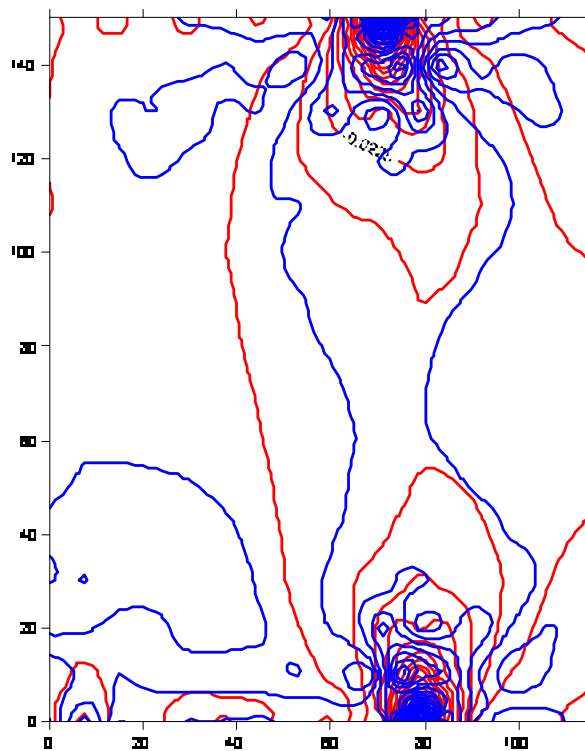


Gambar 4.20 Kontur Tegangan Utama pada *Bi-surface Shear Test* (Momayez et al., 2005)

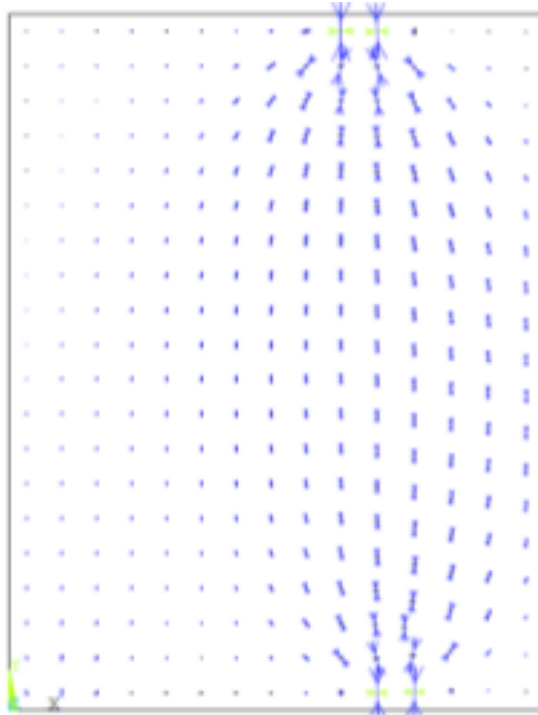




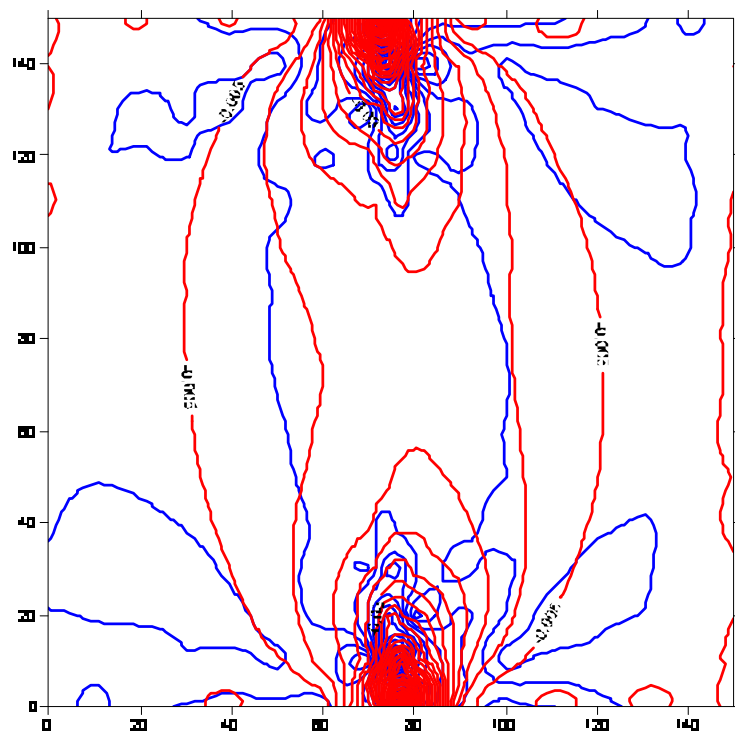
Gambar 4.21 Vektor Tegangan Utama pada *Bi-surface Shear Test* (Momayez et al., 2005)



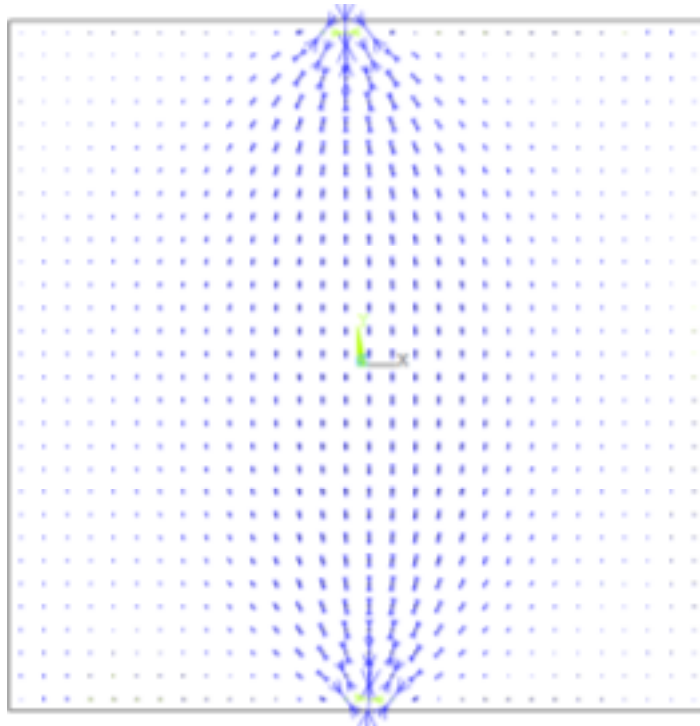
Gambar 4.22 Kontur Tegangan Utama pada *Modified Guillotine Test* (Beushausen and Alexander, 2008)



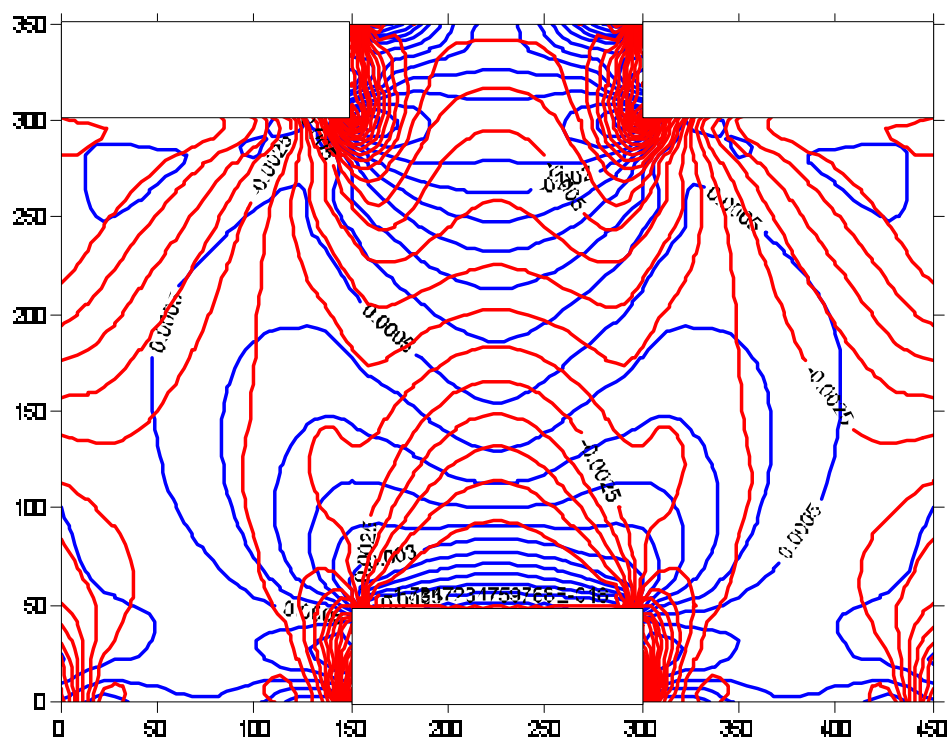
Gambar 4.23 Vektor Tegangan Utama pada *Modified Guillotine Test* (Beushausen and Alexander, 2008)



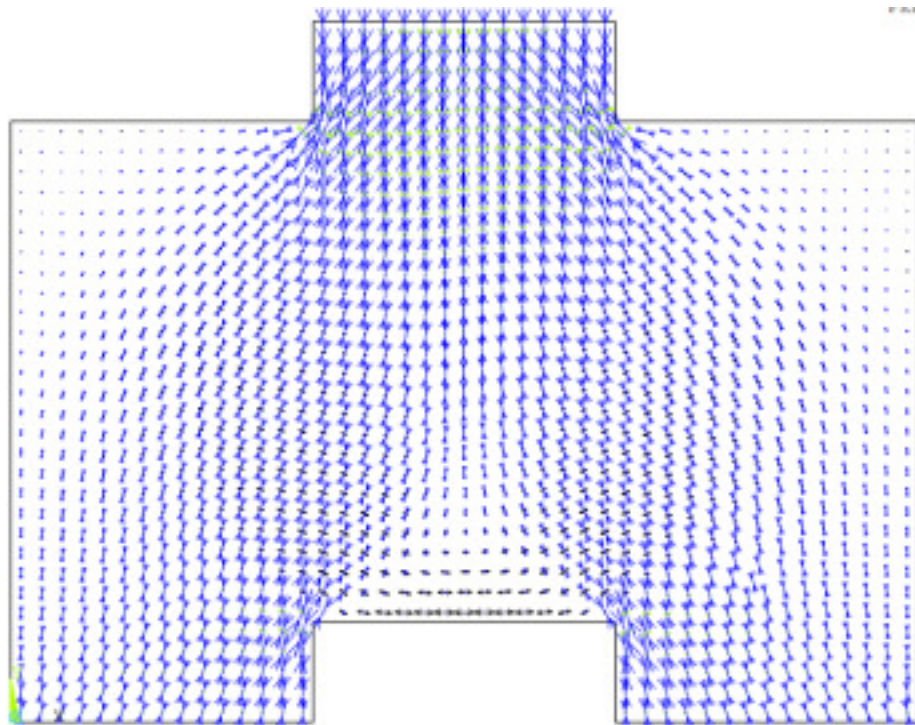
Gambar 4.24 Kontur Tegangan Utama pada *Modified FIP Direct Shear Test* (Beushausen and Alexander, 2008)



Gambar 4.25 Vektor Tegangan Utama pada *Modified FIP Direct Shear Test* (Beushausen and Alexander, 2008)



Gambar 4.26 Kontur Tegangan Utama *Push-Out Test* (Qian et al., 2009)



Gambar 4.27 Vektor Tegangan Utama *Push-Out Test* (Qian et al., 2009)

Hasil analisis menunjukkan bahwa SHRP *Dual L-Shape Test* dan *Bi-surface Shear Test* memberikan hasil yang lebih representatif bila dibandingkan dengan model pengujian lainnya, hal ini ditandai dengan:

1. Komponen gaya normal tegak lurus bidang geser yang relatif kecil.
2. Distribusi tegangan geser yang lebih merata, sehingga diharapkan akan memberikan gambaran hasil kuat geser yang lebih akurat.

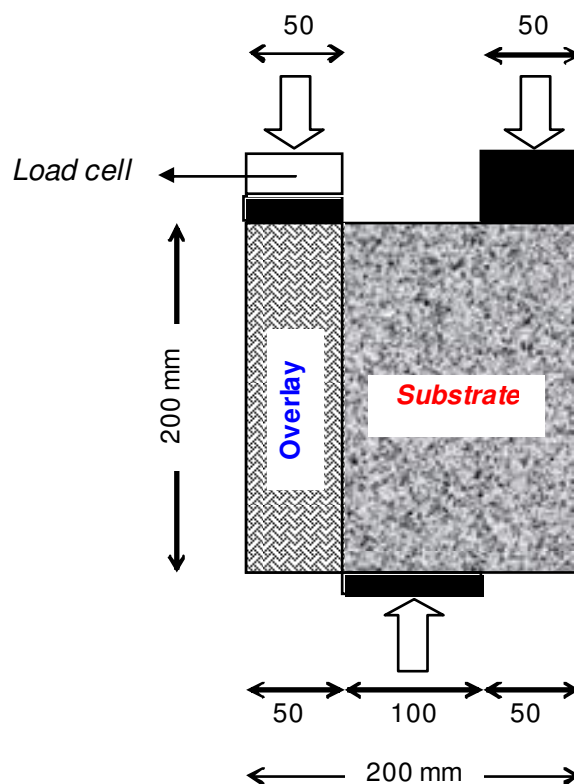
Adapun kelemahan yang dapat dijumpai pada pengujian SHRP *Dual L-Shape Test* antara lain:

1. Cetakan dan proses pengecoran benda uji cukup sulit, selain itu dimensi benda uji cukup besar sehingga diperlukan beberapa kali pengadukan untuk mendapatkan jumlah benda uji yang representatif. Hal ini dapat berakibat pada kurang homogennya karakteristik beton yang digunakan sebagai benda uji.
2. Bekerjanya tegangan tarik tegak lurus bidang geser akan mengakibatkan hasil uji yang bersifat *under estimate*.

Adapun kelemahan yang dapat dijumpai pada pengujian *Bi-surface Shear Test* antara lain:

1. Distribusi tegangan geser pada bidang *interface* kurang merata.
2. Dalam menginterpretasikan hasil pengujian, Momayez et al. (2005) tidak mempertimbangkan bahwa terdapat perbedaan besaran gaya yang akan ditanggung oleh lapis *overlay* dengan lapis *substrate* sebagai konsekuensi dari perbedaan nilai modulus elastisitas material yang digunakan.

Berdasarkan hasil analisis di atas, maka diusulkan metode pengujian sebagai berikut: dimensi benda uji 200x200x200 mm, tebal lapis *overlay* 50 mm, menggunakan 3 (tiga) tumpuan plat baja dengan lebar tumpuan 50 mm, 100 mm, dan 50 mm, yang dipasang simetris dengan acuan posisi bidang geser seperti terlihat pada Gambar 4.28.

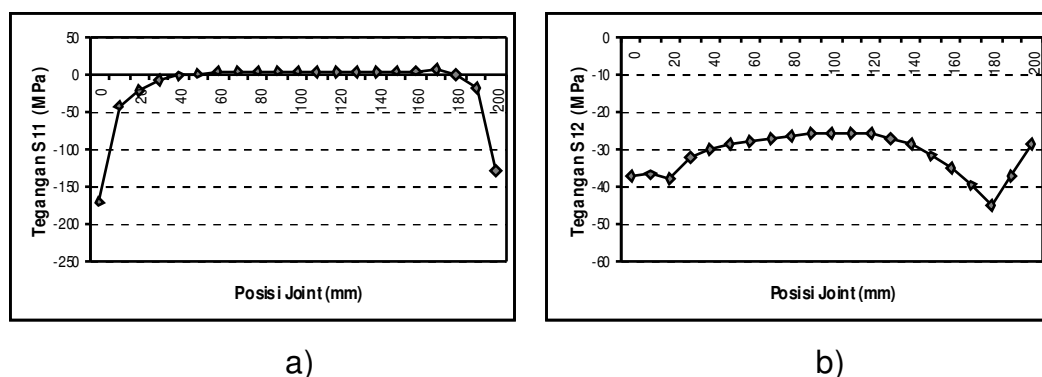


Gambar 4.28 Skema Usulan Pengujian *Bi-Surface Shear Test* yang telah Disempurnakan (*Modified Bi-Surface Shear Test*)

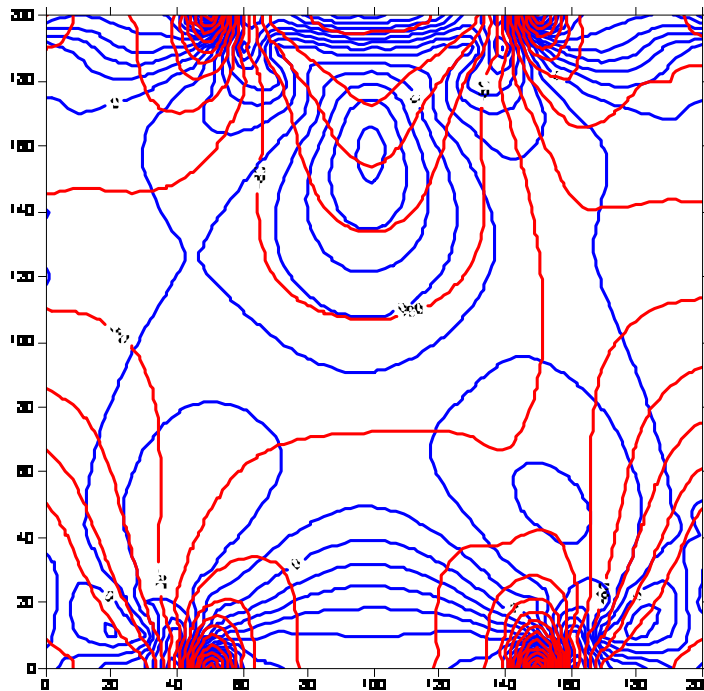
Metode uji kuat lekat yang diusulkan (*Modified Bi-surface Shear Test*) akan dilaksanakan dengan alat *Universal testing Machine (UTM)* yang dalam kenyataannya akan dijumpai jenis pembebanan dengan deformasi yang seragam.

Oleh karena itu, untuk memperoleh hasil analisis yang lebih detail sesuai dengan usulan uji kuat lekat antara beton lama dengan beton baru, maka dilakukan analisis metode elemen hingga, dengan mengasumsikan terjadinya pembebanan deformasi seragam.

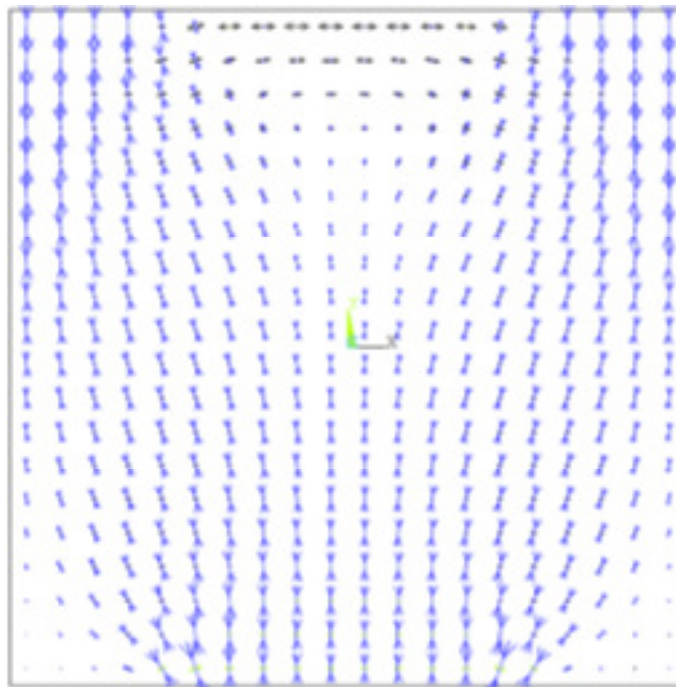
Hasil analisis tegangan pada uji kuat lekat antara beton lama dengan beton baru yang diusulkan (*Modified Bi-surface Shear Test*), dengan asumsi terjadinya pembebanan berupa deformasi seragam pada bidang tumpuan menghasilkan distribusi tegangan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.29, Gambar 4.30 dan Gambar 4.31 berikut.



Gambar 4.29 Profil Distribusi Tegangan a) Normal Tegak Lurus Bidang Normal (S11) dan b) Tegangan Geser *Modified Bi-surface Shear Test* dengan Beban Deformasi Seragam (rencana cara pengujian yang akan dilaksanakan)



Gambar 4.30 Kontur Tegangan Utama pada *Modified Bi-surface Shear Test* (rencana cara pengujian yang akan dilaksanakan)



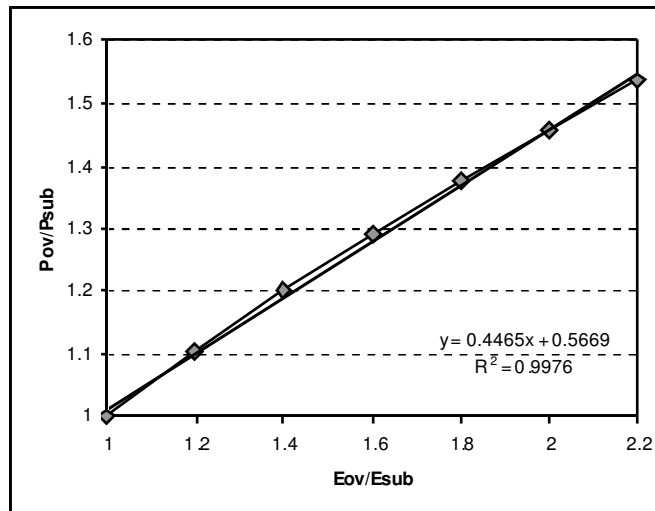
Gambar 4.31 Vektor Tegangan Utama pada *Modified Bi-surface Shear Test* (rencana cara pengujian yang akan dilaksanakan)

Keunggulan yang dapat diharapkan dari *Modified Bi-surface Shear Test* adalah:

1. Cetakan, dan proses pengecoran benda uji cukup mudah.
2. Arah pengecoran dan pembebanan dapat disesuaikan dengan kondisi sebenarnya di lapangan.
3. Instrumen penelitian yang diperlukan cukup sederhana.
4. Analisis tegangan geser menunjukkan distribusi yang relatif seragam di sepanjang bidang geser.
5. Hasil analisis tegangan normal arah tegak lurus bidang geser menunjukkan nilai mendekati nol. Pada analisis tegangan ini memang ditemui adanya tegangan normal arah tegak lurus bidang geser sampai kedalaman  $\pm 3$  cm, dari masing-masing arah beban. Akan tetapi, pada satu sisi berupa tegangan tekan dan pada sisi lainnya berupa tegangan tarik dengan nilai yang relatif sama besar. Dengan kondisi ini diharapkan dapat diperoleh hasil pengujian yang lebih representatif.

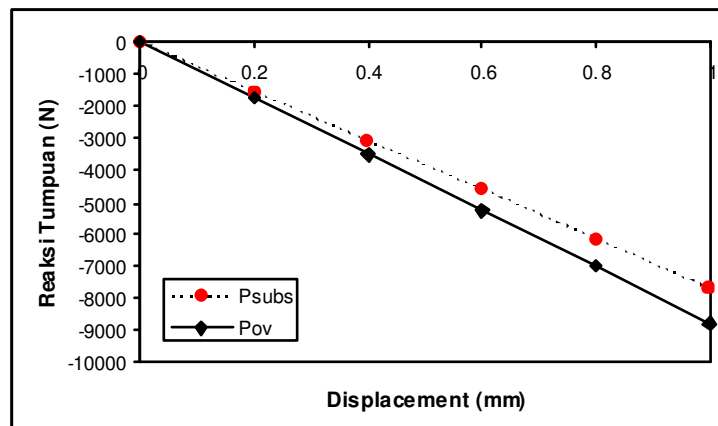
Dengan mempertimbangkan bahwa kualitas beton untuk lapis *overlay* dipersyaratkan memiliki kualitas yang lebih baik daripada lapis *substrate*, maka dilakukan simulasi dengan berbagai perbandingan nilai (rasio) antara modulus elastisitas beton lapis *overlay* ( $E_{ov}$ ) dengan lapis *substrate* ( $E_{subs}$ ). Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat perbedaan besaran gaya yang ditanggung oleh bidang geser pada lapis *substrate* dengan bidang geser yang merupakan pertemuan antara lapis *substrate* dengan lapis *overlay*. Hal ini dapat dipahami karena modulus elastisitas lapis *overlay* lebih besar daripada modulus elastisitas lapis *substrate*, sehingga lapis *overlay* memiliki kekakuan yang lebih besar pula. Hasil simulasi yang menunjukkan hubungan antara rasio ( $E_{ov}/E_{subs}$ ) dengan gaya yang ditanggung ( $E_{ov}/E_{subs}$ ), selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 4.32.





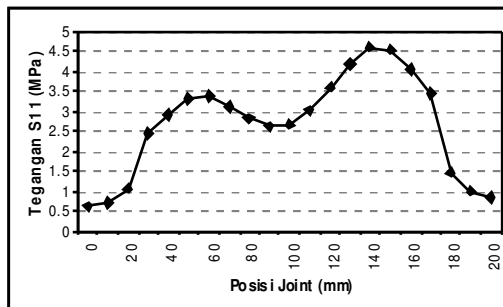
Gambar 4.32 Proporsi Besaran Gaya pada Dua Bidang Geser sebagai Fungsi Perbedaan Modulus Elastisitas dalam pengujian *Modified Bi-surface Shear Test* (rencana cara pengujian yang akan dilaksanakan)

Hal ini secara lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 4.33 yang menunjukkan bahwa pada besaran *displacement* yang sama terdapat perbedaan besaran gaya pada bidang tumpuan di atas material *substrate* dengan bidang tumpuan di atas *overlay*.

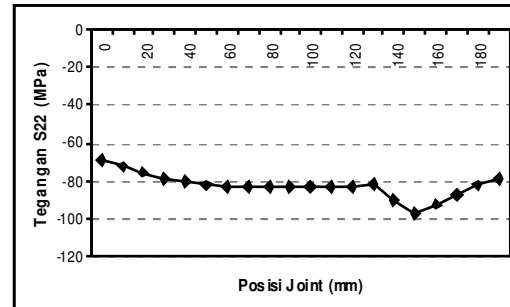


Gambar 4.33 Hubungan *Displacement-Reaksi Tumpuan* pada *Modified Bi-surface Shear Test* (Nilai  $E_{ov}/E_{subs}$  digunakan 1,275)

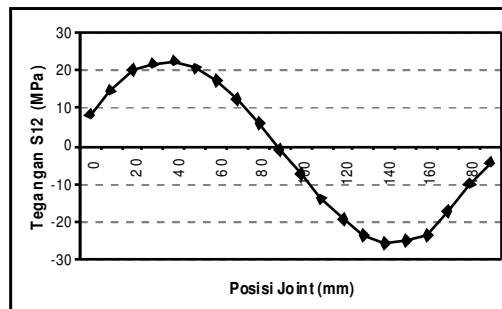
Analisis distribusi tegangan pada arah potongan bidang horisontal juga telah dilakukan. Adapun hasil analisis tersebut dapat dicermati pada Gambar 4.34 berikut:



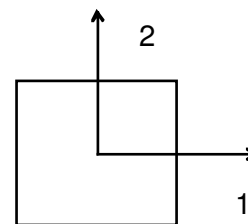
a)



b)



c)



Gambar 4.34 Profil Distribusi Tegangan dalam Arah Potongan Horizontal  
a)  $S_{11}$ , b)  $S_{22}$ , dan c)  $S_{12}$  dalam pengujian *Modified Bi-surface Shear Test* dengan *UTM* (rencana cara pengujian yang akan dilaksanakan)

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Berat jenis beton yang didasarkan pada *demoulded density* menunjukkan bahwa berat jenis beton ringan berbanding terbalik dengan fraksi volume breksi batu apung yang digunakan.
2. Beton ringan struktural dapat dihasilkan dengan pemanfaatan breksi batu apung sebagai agregat kasar dengan fraksi volume antara 55% sampai dengan 75% dari total volume agregat dalam adukan beton.
3. Kekuatan tekan beton ringan dapat ditingkatkan dengan cara menggantikan sebagian semen dengan silika fume. Peningkatan kuat tekan optimum dapat dicapai hingga 13,07% pada saat sebagian semen digantikan dengan silika fume hingga 9% dari berat semen.
4. Penambahan serat ke dalam adukan beton ringan akan menyebabkan berkurangnya kelecakan beton.
5. Berat jenis beton yang didasarkan pada *demoulded density* menunjukkan bahwa berat jenis beton ringan akan bertambah berbanding lurus dengan fraksi volume serat baja yang digunakan.
6. Kekuatan tekan beton ringan dapat meningkat dengan adanya penambahan serat ke dalam adukan beton. Peningkatan kuat tekan optimum dapat dicapai hingga 22,44% pada saat dilakukan penambahan serat campuran dengan 0,1% polypropylene dan 1,0% serat baja berdasarkan volume adukan beton.
7. Modulus elastisitas beton ringan dapat meningkat dengan adanya penambahan serat ke dalam adukan beton. Peningkatan modulus elastisitas yang optimum dapat dicapai hingga 24,71% pada saat dilakukan penambahan serat campuran dengan 0,1% polypropylene dan 0,5% serat baja berdasarkan volume adukan beton.

8. Kuat tarik belah beton ringan dapat ditingkatkan dengan penambahan serat ke dalam adukan beton. Peningkatan kuat tarik belah yang optimum dapat dicapai hingga 222,28% pada saat dilakukan penambahan serat campuran dengan 0,1% polypropylene dan 1,5% serat baja berdasarkan volume adukan beton.
9. Kuat lentur beton ringan dapat ditingkatkan dengan penambahan serat ke dalam adukan beton. Peningkatan kuat lentur yang optimum dapat dicapai hingga 187,46% pada saat dilakukan penambahan serat campuran dengan 0,1% polypropylene dan 1,5% serat baja berdasarkan volume adukan beton.
10. Usulan metode *modified bi-surface shear test* pada uji geser *interface* antara dua lapis beton yang berbeda dapat memberikan alternatif pengujian yang mudah dilaksanakan dan distribusi tegangan yang representatif.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdou, L., Saada, R.A., Meftah, F., and Mebarki, A., (2006), "Experimental Investigations of The Joint-Mortar Behaviour", *Mechanics Research Communications* 33, pp. 370–384
- American Concrete Institute, (2006), *Manual of Concrete Practice*, Michigan: ACI.
- American Concrete Institute Committee 318, (2008), *ACI 318-08: Building code requirements for structural concrete*, Michigan: ACI.
- Ahmed, S.F.U., Maalej, M., and Paramasivam, P., (2007), "Flexural Responses of Hybrid Steel–Polyethylene Fiber Reinforced Cement Composites Containing High Volume Fly Ash", *Construction and Building Materials* 21, pp. 1088–1097.
- Altun, F., Haktanir, T., and Ari, K., (2007), "Effects of Steel Fiber Addition on Mechanical Properties of Concrete and RC Beams", *Construction and Building Materials* 21, pp. 654–661.
- Badan Standardisasi Nasional, (2000), *SNI 03-2847-2000: Tata Cara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, Bandung: BSN.
- Bakhsh, K.N., (2010), *Evaluation of Bond Strength between Overlay and Substrate in Concrete Repairs*, Royal Institute of Technology (KTH): Master Degree Thesis
- Balendran, R.V., Zhou, F.P., and Leung, A.Y.T., (2002), "Influence of Steel Fibres on Strength and Ductility of Normal and Lightweight High Strength Concrete", *Building and Environment* 37, pp. 1361–1367.
- Banthia, N., and Nandakumar, N., (2003), "Crack Growth Resistance of Hybrid Fiber Reinforced Cement Composites", *Cement & Concrete Composites* 25, pp. 3–9.
- Beushausen, H. and Alexander, M.G., (2008), "Bond strength development between concretes of different ages", *Magazine of Concrete Research*, 60, No. 1, February, pp. 65–74.
- Birkeland, P. W., and Birkeland, H.W., (1966), "Connections in Precast Concrete Construction", *Journal of the American Concrete Institute* 63, pp. 345-368.
- Bonaldo, E., Barros, J.A.O, Lourenço, P.B., (2005), "Bond characterization between concrete substrate and repairing SFRC using pull-off testing", *International Journal of Adhesion & Adhesives* 25, pp. 463–474.

- Cable, J.K., Morud, J.L., and Tabbert, T.R., (2006), *Evaluation of Composite Pavement Unbonded Overlays: Phase III*, Iowa State University: Center for Transportation Research and Education
- Camps, G., Turatsinze, A., Sellier, A., Escadeillas, G., and Bourbon, X., (2008), "Steel-fibre-reinforcement and hydration coupled effects on concrete tensile behaviour", *Engineering Fracture Mechanics* 75, pp. 5207–5216.
- Canadian Standard Association, (2004), A23.3-04 Design of concrete structures, Mississauga: CSA.
- Carlswärd, J., (2006), *Shrinkage cracking of steel fibre reinforced self compacting concrete overlays Test methods and theoretical modelling*, Luleå University of Technology: Doctoral Thesis.
- Chen, P.W., Fu, X., and Chung, D.D.L., (1995), "Improving the bonding between old and new concrete by adding carbon fibers to the new concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 3., pp. 491-496.
- Dehn, F., Holschemacher, K. and Weiße, D., (2000), "Self-Compacting Concrete (SCC) Time Development of the Material Properties and the Bond Behaviour", *LACER No.5.*, pp. 115-124.
- Domone, P.L. (2007), "A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete", *Cement & Concrete Composites* 29, pp. 1–12.
- EFNARC, (2005), *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use*, Norfolk UK: European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
- Elsaigh, W.A., (2001), *A Comparative Evaluation of Plain and Steel Fiber Reinforced Concrete Ground Slabs*, University of Pretoria: Master of Engineering (Transportation Engineering) Dissertation.
- Elsaigh, W.A., (2007), *Modelling The Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Pavement*, University of Pretoria: Ph.D. of Engineering (Transportation Engineering) Dissertation.
- Ellouze, A., Ouezdou, M.B., Karray, M.A., (2010), "Experimental Study of Steel Fiber Concrete Slabs Part I: Behavior under Uniformly Distributed Loads", *International Journal of Concrete Structures and Materials* Vol.4, No.2, pp.113-118.
- European Committee for Standardization, (2004), *Euro-Code 2: design of concrete structures - part 1.1: general rules and rules for buildings (BS EN 1992-1-1:2004)*, BSI.
- EuroLightCon, (2000), *Tensile strength as design parameter*, European Union – Brite EuRam III.

- Felekoglu, B., Turkel, S., Baradan, B., (2007), "Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete", *Building and Environment* 42, pp. 1795–1802.
- Gillum, A.J., Shahrooz, B.M., and Cole, J.R., (2001), "Bond Strength between Sealed Bridge Decks and Concrete Overlays", *ACI Structural Journal*, V. 98, No. 6, November-December, pp. 872-879.
- Green, S.M.F, Brooke, N.J., McSaveney, L.G., and Ingham, J.M., (2011), "Mixture Design Development and Performance Verification of Structural Lightweight Pumice Aggregate Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 8, pp. 1211-1219.
- Habel, K., (2004), *Structural Behaviour Of Elements Combining Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC) and Reinforced Concrete*, École Polytechnique Fédérale De Lausanne: Doctoral Thesis.
- Habel, K., Denarie, E., and Bruhwiler, E., (2007), "Experimental Investigation of Composite Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete and Conventional Concrete Members", *ACI Structural Journal*, Vol. 104, No. 1., January-February, pp. 93-101.
- Hannant, D.J., (1978), *Fiber Cements and Fiber Concretes*, Chicester: John Wiley & Sons.
- Hemansen, B. R. and Cowan, J., (1974), "Modified Shear-Friction Theory for Bracket Design", *ACI Journal* 71(2), pp. 55-60.
- Hofbeck, J. A., I. O. Ibrahim, and A. H. Mattock, (1969), "Shear Transfer in Reinforced Concrete", *Journal of the American Concrete Institute* 66(2), pp. 119-128.
- Hossain, K.M.A, (2008), "Bond characteristics of plain and deformed bars in lightweight pumice concrete", *Construction and Building Materials* 22, pp. 1491–1499.
- Hossain, K.M.A, Ahmed, S., and Lachemi, M., (2011), "Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics", *Construction and Building Materials* 25, pp. 1186–1195.
- Julio, E.N.B.S., Branco, F.A.B., Silva, V.D., and Lourenco, J.F., (2006), "Influence of Added Concrete Compressive Strength on Adhesion to An Existing Concrete Substrate", *Building and Environment* 41, pp. 1934–1939.
- Júlio, E.N.B.S., Dias-da-Costa, D., Branco, F.A.B., and Alfaiate, J.M.V., (2010), "Accuracy of design code expressions for estimating longitudinal shear strength of strengthening concrete overlays", *Engineering Structures* 32, pp. 2387-2393.

- Kabay, N., & Akoz, F., (2011), "Effect of prewetting methods on some fresh and hardened properties of concrete with pumice aggregate", *Cement & Concrete Composites*, doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.11.022.
- Kahn, L. F., and A. D. Mitchell, (2002), "Shear Friction Tests with High Strength Concrete", *ACI Structural Journal* 99, No. 1, pp. 98-103.
- Kheder, G.F., Al Kafaji, J.M., and Dhiab, R.M., (2010), "Flexural strength and cracking behavior of hybrid strength concrete beams", *Materials and Structures* 43, pp. 1097–1111.
- Kheder, G.F., and Al Jadiri, R.S., (2010), "New Method for Proportioning Self-Consolidating Concrete Based on Compressive Strength Requirements", *ACI Materials Journal*, V. 107, No. 5, pp. 490-497
- Lapko, A., Buraczewska, B.S., and Tomaszewicz, A., (2005), "Experimental and Numerical Analysis of Flexural Composite Beams with Partial Use of High Strength/High Performance Concrete", *Journal of Civil Engineering and Management Vol. XI No. 2*, pp. 115-120.
- Li, G., Xie, H., and Xiong, G. (2001), "Transition Zone Studies of New-to-Old Concrete with Different Binder", *Cement & Concrete Composites* 23, pp. 381–387.
- Lo, T.Y., Tang, W.C., and Nadeem, A., (2008), "Comparison of carbonation of lightweight concrete with normal weight concrete at similar strength levels", *Construction and Building Materials* 22, pp. 1648–1655.
- Loov, R. E., and A. K. Patnaik, (1994), "Horizontal Shear Strength of Composite Concrete Beams with a Rough Interface." *PCI Journal* 39, No. 1, pp. 48-69.
- Loser, R., and Leemann, A., (2009), "Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete", *Materials and Structures* 42, pp. 71–82
- Lourenco, P.B., Barros, J.O., and Oliveira, J.T. (2004), "Shear testing of stack bonded masonry", *Construction and Building Materials* 18, pp. 125–132.
- Mo, Y.L., and Lai, H.C., (1995), "Effect of Casting on Ductilities of Reinforced Concrete Beams", *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No. 4, July-August, pp. 419-424.
- Mattock, A.H., Mau, S.T., Hsu, T.T.C., and Walraven et al, (1988), "Reader Comments: Influence of Concrete Strength and Load History on the Shear Friction Capacity of Concrete Members", *PCI Journal*, January-February 1988, pp 165-170.



- Momayez, A., Ehsani, M.R., Ramezaniapour, A.A., and Rajaie, H., (2005), "Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials", *Cement and Concrete Research* 35, pp. 748–757.
- Momayez, A., Ramezaniapour, A.A., Rajaie, H., and Ehsani, M.R., (2004), "Bi-Surface Shear Test for Evaluating Bond between Existing and New Concrete", *ACI Materials Journal* V. 101, No. 2, March-April 2004, pp. 99–106.
- Muslich Hartadi Sutanto, (2009), *Assesment of Bond Between Asphalt Layers*, University of Nottingham: Ph.D. Thesis.
- Nassif, H.H., and Najm, H., (2004), "Experimental and analytical investigation of ferrocement–concrete composite beams", *Cement & Concrete Composites* 26, pp. 787–796.
- Nawy, E.G., (2008), Proportioning Concrete Structural Elements by the ACI 318-08 Code, In Nawy E.G. (ed.) *Concrete Construction Engineering Handbook (2nd Edition)*, pp. 36-1 – 36-36, Boca Raton: CRC Press.
- Neville, A.M., (1996), *Properties of Concrete, Fourth and Final Edition*, New York: John Wiley and Sons.
- Ostertag, C.P., and Blunt, J., (2007), *Hybrid Fiber Reinforced Concrete for Use in Bridge Approach Slabs*, Karachi: CBM-CI International Workshop
- Özcan, D.M., Bayraktar, A., Sahin, A., Haktanir, T., and Türker, T., (2008), "Experimental and Finite Element Analysis on the Steel Fiber-Reinforced Concrete (SFRC) Beams Ultimate Behavior", *Construction and Building Materials* 23, pp. 1064–1077.
- Pelisser, F., Neto, A.B.S.S., La Rovere, H.L., and Pinto, R.C.A., (2010), "Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking", *Construction and Building Materials* 24, pp. 2171–2176.
- Pusat Pembinaan Sumber Daya Investasi, (2012), *Sistem informasi Sumber Daya Investasi: Potensi Material Konstruksi Propinsi DI Yogyakarta*, Kementerian Pekerjaan Umum, Diakses dari [http://www.pusbinsdi.net/main.php?page=potensi\\_material&type=&op=detail&id\\_prop=12](http://www.pusbinsdi.net/main.php?page=potensi_material&type=&op=detail&id_prop=12)
- Qian, S., Lepech, M.D., Kim, Y.Y., and Li, V.C., (2009), "Introduction of Transition Zone Design for Bridge Deck Link Slabs Using Ductile Concrete", *ACI Structural Journal*, V. 106, No. 1, January-February, 96-105.
- Rodezno, M.C., and Kaloush, K.E., (2010), "Effect of Different Dosages of Polypropylene Fibers in Thin Whitetopping Concrete Pavements", *ACI Material Journal*, Vol. 107, No. 1, January-February, pp. 42-47.

- Roesler, J.R., Altoubat, S.A., Lange, D.A., Rieder, K., and Ulreich, G.R., (2006), "Effect of Synthetic Fibers on Structural Behavior of Concrete Slabs-on-Ground", *ACI Materials Journal*, V. 103, No. 1, January-February, pp. 3-10.
- Romanoschi, S.A., and Metcalf, J.B., (2002), "Errors in Pavement Layer Moduli Backcalculation due to Improper Modeling of the Layer Interface Condition", *TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM: PAPER 03-3559*, Transportation Research Board.
- Saemann, J. C., and Washa, G. W., (1964), "Horizontal shear connections between precast beams and cast-in-place slabs", *American Concrete Institute Journal* 61(11), pp. 1383-1409.
- Saliba, J., Rozière, E., Grondin, G., and Loukili, A., (2010), "Influence of shrinkage-reducing admixtures on plastic and long-term shrinkage", *Cement & Concrete Composites*, xxx-xxx.
- Santos, P.D.M., and Julio, E.N.B.S., (2011), "Factors Affecting Bond between New and Old Concrete", *ACI Materials Journal*, V. 108, No. 4, pp. 449-456
- Shin, H.C., and Wan, Z., (2010). "Interfacial Properties between New and Old Concretes", *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies Main Proceeding ed. J Zachar, TR Naik, E Ganjian*, Universita Politecnica delle Marche, Ancona, June 28-30.
- Silfwerband, J., (2003), "Shear bond strength in repaired concrete structures", *Materials and Structures / Matériaux et Constructions*, Vol. 36, pp 419-424.
- Sin, L.H., (2007), *Structural Response of Lightweight Concrete Beams in Flexure*, National University of Singapore: PhD Thesis.
- Sivakumar, A., and Santhanam, M., (2007), "Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres", *Cement & Concrete Composites* 29, pp. 603-608.
- Slamet Widodo, (2009), "Efek Penambahan Serat Polypropylene Terhadap Karakteristik Beton Segar Jenis Self-Compacting Concrete", *Media Komunikasi Teknik Sipil Tahun 17 Nomor 2*, pp.189-197.
- Slamet Widodo, (2010), "Experimental study on some fresh and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced self compacting concrete", *Media Teknik Sipil Volume 10 Nomor 2*, pp.65-70.
- Sorelli, L.G., Meda, A., and Plizzari, G.A., (2006), "Steel Fiber Concrete Slabs on Ground: A Structural Matter", *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 4, July-August, pp. 551-558.

- Su N., Hsu K.C., Chai H.S., (2001), "A Simple Mix Design Method for Self-Compacting Concrete", *Cement and Concrete Research* 31, pp. 1799–1807.
- Thanoon, W.A., Yardim, Y., Jaafar, M.S., and Noorzaei, J., (2010), "Structural behaviour of ferrocement–brick composite floor slab panel", *Construction and Building Materials* 24, pp. 2224–2230.
- Tim Redaksi 03, (2012, 13 Februari), *Di Atas Proyeksi, Pasar Semen Indonesia Tembus Rp 48 Triliun di 2011*, Diakses dari: <http://www.duniaindustri.com/berita-industri-semen-indonesia/804-di-atas-proyeksi-pasar-semen-indonesia-tembus-rp-48-triliun-di-2011.html>.
- Tsai, C.T., Li, L.S., Chang, C.C., and Hwang, C.L., (2009), "Durability Design and Application of Steel Fiber Reinforced Concrete in Taiwan", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 34, Number 1B, pp. 57-79.
- Tsoukantas, S.G., and Tassios, T.P., (1989), "Shear Resistance of Connections between Reinforced Concrete and Linear Precast Elements", *ACI Structural Journal* Vol. 86, No. 3, pp. 242-249.
- Walraven, J., Frenay, J., and Puijssers, A., (1987), "Influence of Concrete Strength and Load History on the Shear Friction Capacity of Concrete Members", *PCI Journal*, Vol. 32, No. 1, pp. 66 – 84.
- Wongtanakitcharoen, T., and Naaman, A.E., (2007), "Unrestrained early age shrinkage of concrete with polypropylene, PVA, and carbon fibers", *Materials and Structures* 40, pp. 289–300
- Xiaopeng, L., (2005), *Structural Lightweight with Pumice Agregate*, National University of Singapore: Master Thesis.
- Xu, Q., Zhou, Q., Medina, C., Chang, G.K., and, Rozycki, D.K. (2010), "Experimental and numerical analysis of a waterproofing adhesive layer used on concrete-bridge decks", *International Journal of Adhesion & Adhesives* 29, pp. 525–534.
- Yao, W., Li, J., and Wu, K., (2003), "Mechanical Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete at Low Fiber Volume Fraction", *Cement and Concrete Research* 33, pp. 27–30.

## **LAMPIRAN**

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE POTENTIAL USE OF PUMICE BRECCIA AS COARSE AGGREGATE IN STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE

Slamet Widodo<sup>1,3</sup>, Iman Satyarno<sup>2</sup>, Sri Tadjono<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering and Planning, Yogyakarta State University, Yogyakarta, Indonesia

<sup>2</sup> Department of Civil and Environmental Engineering, Gadjah Mada University, Yogyakarta, Indonesia

<sup>3</sup> Department of Civil Engineering, Diponegoro University, Semarang, Indonesia

\*Corresponding E-mail: swidodo@outlook.com

Received 10 November 2013; Revised \_\_\_\_\_; Accepted \_\_\_\_\_

### Abstract

Lightweight concrete application in construction works is growing rapidly in these recent years due to its advantages over ordinary concrete. In this research, pumice breccia which can be found abundantly in Indonesia is proposed to be utilized as the coarse aggregate. This paper experimentally examines the effects of aggregate compositions and partial replacement of portland cement with silica fume on the demoulded density and compressive strength of lightweight concrete which utilizing pumice breccia as coarse aggregate. Nine groups of concrete test specimens were investigated. Test results indicate that the demoulded density of lightweight concrete tends to decrease, inversely proportional to the addition of the volume fraction of pumice aggregate into the mixes. Structural lightweight concrete can be produced when the lightweight concrete mixtures utilizing pumice breccia as coarse aggregate with the volume fraction in between 55% to 75% to the total volume of coarse and fine aggregate, and the compressive strength of structural lightweight concrete can be improved proportionally up to 13.07% when the portland cement partially replaced with silica fume up to 9% by weight of cement.

**Keywords:** *Hardened properties, Lightweight concrete, Pumice breccia, Silica fume*

### 1.0 Introduction

Lightweight concrete (LWC) application for construction works has been widely used in these recent years both for structural and non-structural purposes due to its advantages over ordinary concrete. The utilization of lightweight concrete in modern construction works is increasing, owing to the advantage that its lower density results in a significant benefit in terms of load bearing elements of smaller cross sections and a corresponding reduction in the size of the foundation. Furthermore, the reduction in weight by the use of lightweight concrete will be advantageous, especially for building structures which are located in seismic zones.

The maximum density of concrete which allowed to be categorized as lightweight concrete in some European construction codes is limited to 1850 kg/m<sup>3</sup> [1], while the limitation in Indonesian National Standard is 1900 kg/m<sup>3</sup> [2], compared with that of 2400 kg/m<sup>3</sup> for normal weight concrete (NWC). According to most of the concrete structures codes in some American, European and Asian countries, mixtures of uncrushed and/or crushed grains for natural and/or manufactured minerals can be classified as lightweight aggregate when it has dry loose bulk density less than 1200 kg/m<sup>3</sup> for fine aggregate and 1000 kg/m<sup>3</sup> for coarse aggregate [1-6].

Some methods that widely used for lightweight concrete production include utilization of natural lightweight aggregates such as diatomite, volcanic cinders, and pumice or artificial by-products such as expanded shale, clay, slate, perlite, and sintered pulverized fuel ash (PFA). Lightweight concrete that developed using natural or artificial aggregate is classified by the ACI 213 (2003) into three categories based on its strength and density. The first category is termed low strength, corresponding to low density and therefore mostly used for insulation purposes. The second category is moderate strength which is used for filling and block concrete. The third

category is structural lightweight concrete which can be utilized for reinforced concrete. According to the classification given by ACI 213 (2003), LWC for structural purposes is defined as concrete with a density range of 1120 to 1920 kg/m<sup>3</sup> and strength grade not less than 17 MPa [6]. In this research, pumice breccia which can be found abundantly in Indonesia proposed to be utilized as the coarse aggregate for the development of structural lightweight aggregate concrete. The main objectives of this research are: (1) optimizing the composition between natural sand that is used as fine aggregate and pumice breccia which is proposed to be utilized as coarse aggregate to develop lightweight aggregate concrete mixtures which aimed to meet the technical specification for structural applications, and (2) examining the effects of mineral admixtures addition on the hardened properties of lightweight aggregate concrete using pumice breccia as coarse aggregate.

## 2.0 Literature Review

Pumice breccia is a type of coarse grained pyroclastic rocks with its breccia fragments dominated by pumice with highly variable shape and size, white-gray color, and its matrix consisting of limestone with amorphous silica. Pumice breccia formed by the volcanism activity. Therefore, it can be found abundantly along the volcanic line in Indonesia. The location that had been identified as the largest pumice breccia deposit area is Semilir Formation. The Semilir Formation was typically originated from products of a very explosive volcanic activity. It is a widespread mountainous area at the southern part of Java Island. The formation is widely distributed from the west side at Pleret and Piyungan areas in Bantul Regency, Special Province of Yogyakarta until Eromoko area in Wonogiri Regency, Central Java Province in the east [7]. Based on the official data which is released by the center of investigation resources development in the Indonesian ministry of public works, the Special Province of Yogyakarta has 2.50 billion m<sup>3</sup> deposit of pumice breccia which is located in Bantul, Gunung Kidul and Sleman region [8].



**Figure 1:** (a) Part of Pumice Breccia Deposit in the Semilir Formation, (b) Crushed Pumice Breccia

ACI 213R-03, Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete defines structural lightweight-aggregate concrete made with structural lightweight aggregate as defined in ASTM C 330. The concrete has a minimum 28-day compressive strength of 2500 psi (17 MPa), an equilibrium density between 70 and 120 lb/ft<sup>3</sup> (1120 and 1920 kg/m<sup>3</sup>), and consists entirely of lightweight aggregate or a combination of lightweight and normal-density aggregate. From the standpoint of workability and other properties, it is a common practice to use normal-weight sand as fine aggregate, and to limit the nominal size of the lightweight coarse aggregate to a maximum of 19 mm. According to ASTM C 330, fine lightweight and coarse lightweight aggregates are required to have a dry-loose weight not exceeding 1120 kg/m<sup>3</sup> (70 lb/ft<sup>3</sup>) and 880 kg/m<sup>3</sup> (55 lb/ft<sup>3</sup>), respectively [9].



Silica fume (SF) is a byproduct of the silicon and ferrosilicon industry. The reduction of high-purity quartz to silicon at temperatures up to 2000 °C produces SiO<sub>2</sub> vapours, which oxidizes and condense in the low-temperature zone to tiny particles consisting of non-crystalline silica. Silica fume is a very reactive pozzolanic material because of its extreme fineness and very high amorphous silicon dioxide content. Mechanism of silica fume in concrete can be described basically under three roles: (i) pore-size refinement and matrix densification, (ii) reaction with free-lime, and (iii) cement paste–aggregate interfacial refinement. In concrete the characteristics of the transition zone between the aggregate particles and cement paste play a significant role in the cement-aggregate bond. Silica fume addition influences the thickness of transition phase in mortars and the degree of the orientation of the CH crystals in it. The thickness compared with mortar containing only ordinary Portland cement decreases and reduction in degree of orientation of CH crystals in transition phase with the addition of silica fume. Hence mechanical properties and durability are improved because of the enhancement in interfacial or bond strength [10]. A higher ultimate strength can be obtained by designing a mix with a low initial strength gain and cementitious additions. This is partially due to avoidance of micro-cracking associated with high thermal gradients. This effect can be facilitated if strength compliance is measured at 56 instead of 28 days [11].

### 3.0 Methodology

#### 3.1 Materials and Mix Proportion

The mixtures were prepared with blended cement containing 23.13% of SiO<sub>2</sub>, 8.76% of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4.62% of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 58.66% of CaO, 0.90% of MgO, 2.18% of SO<sub>3</sub>, and 1.69% of loss on ignition which satisfies to the requirements in the Indonesian Standards for Pozzolan Portland Cement [10]. The coarse aggregate prepared using continuously graded crushed lightweight pumice breccia from Bawuran Mountain, Bantul District in the Special Province of Yogyakarta which is one of the largest pumice breccia deposits in Indonesia. This pumice breccia has dry-loose bulk density of 760 kg/m<sup>3</sup> with particle density of 1620 kg/m<sup>3</sup> which is satisfied to the technical specification of lightweight aggregate. Therefore, it is proposed to be utilized as coarse aggregate in the mixtures. The coarse aggregate with maximum size of 20 mm were pre-wetted and submerged in water in 24 hours and then air-dried to be in saturated surface dry condition before mixing process. Well-graded natural sand with specific gravity of 2.65 was employed as the fine aggregate. Silica fume, and naphthalene formaldehyde sulfonate based high range water reducer (HRWR) which is comply ASTM C 494-92 Type F were also utilized as concrete admixtures in this research. Detail of mixes proportion in this research can be found in the following Table 1.

**Table 1:** Mixture Proportion

Mix Type	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Silica Fume (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	W/B	Pumice breccia (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	HRWR (lt/m <sup>3</sup> )
M1	500	0	225.00	0.45	420.101	846.252	4.70
M2	500	0	225.00	0.45	513.456	692.388	4.70
M3	500	0	225.00	0.45	606.812	538.524	4.70
M4	500	0	225.00	0.45	700.168	384.660	4.70
M5	500	0	225.00	0.45	793.524	230.796	4.70
M6	485	15	225.00	0.45	606.812	538.524	4.70
M7	470	30	225.00	0.45	606.812	538.524	4.70
M8	455	45	225.00	0.45	606.812	538.524	4.70
M9	440	60	225.00	0.45	606.812	538.524	4.70

### 3.2 Detail of Experimental Works

Hardened properties of concrete mixes were evaluated based on its demoulded density and compressive strength. In order to observe the density on demoulding as declared in BS EN 8500:1 2006 [12], specimens' weight and dimensions were measured 24 hours after concrete casting. The compressive strength were evaluated after the hardened concrete specimens were cured with 56 days water immersion since some of the mixtures utilized silica fume as mineral admixture. Compressive strength and modulus of elasticity evaluation for all the variants of concrete were done on cylinders of 150 mm in diameter and 300 mm length, based on ASTM C-469 [13]. The compressive strength of the concrete was determined as the average of those three specimens for each variant.

### 4.0 Results and Discussions

In order to evaluate the effects of the aggregate composition and utilization of silica fume as mineral admixture on hardened properties of LWC using pumice breccia as coarse aggregate, the demoulded density and the compressive strength of the concrete specimens were tested after 56 days of water immersion to achieve more representative results of concrete strength. The following Table 2 shows the results of the tests.

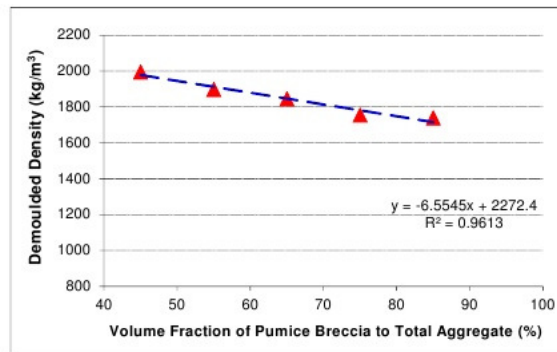
**Table 2:** Effects of Aggregate Composition and Silica Fume Addition on Hardened Properties of Lightweight Concrete with Pumice Breccia Aggregate

Mix type	Demoulded density (kg/m <sup>3</sup> )	Compressive strength (MPa)
M1	1995.146	29.514
M2	1897.910	24.198
M3	1845.090	18.424
M4	1755.056	18.376
M5	1738.850	16.476
M6	1824.682	20.110
M7	1851.092	20.228
M8	1861.896	20.832
M9	1854.093	18.701

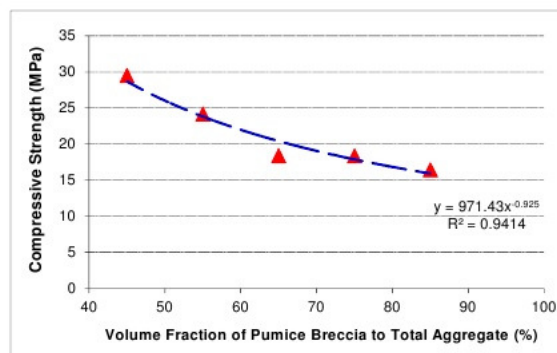
Effect of the volume fraction of pumice breccia aggregate which was used as coarse aggregate to the total volume of concrete aggregate on the demoulded density of hardened lightweight pumice breccia aggregate concrete can be observed in Figure 2. The demoulded density tends to decrease, inversely proportional to the addition of the volume fraction of pumice aggregate into the mixes. It can be clearly predicted in the mix design calculation since pumice breccia has lower density compared to the normal fine aggregate and normal concrete density.

Concrete mixes which are acceptable to be classified as lightweight concrete based on the maximum limit of lightweight concrete density which is required in the Indonesian national standard and most of the International standards can be achieved when the concrete produced using pumice breccia as coarse aggregate, and the volume fraction of coarse pumice aggregate should be not less than 55% to the total volume of coarse and fine aggregate.





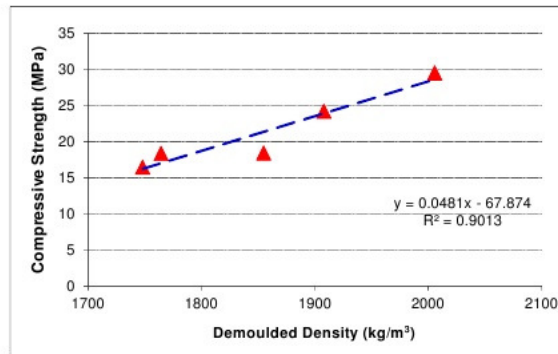
**Figure 2:** Effect of Aggregate Composition on the Demoulded Density of Hardened Lightweight Concrete using Pumice Breccia as Coarse Aggregate



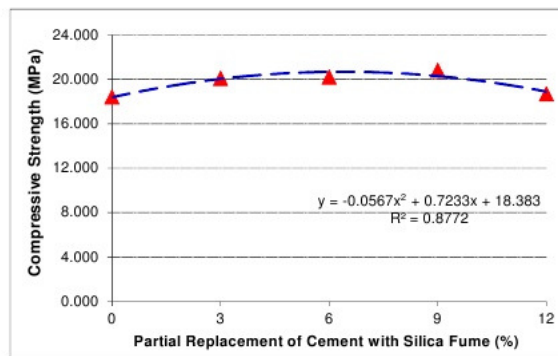
**Figure 3:** Effect of Aggregate Composition on the Compressive Strength of Lightweight Concrete using Pumice Breccia as Coarse Aggregate

Effect of the volume fraction of pumice breccia which was utilized as coarse aggregate to the total volume of coarse and fine aggregate in the concrete mixes on the compressive strength of hardened lightweight concrete can be observed in Figure 3. The compressive strength tends to decrease, inversely proportional to the addition of the volume fraction of the pumice aggregate which utilized as coarse aggregate in the mixes. It can be predicted earlier since pumice breccia which utilized as coarse aggregate has lower strength compared to the normal aggregate and the mortar matrix.

Figure 4 shows that the compressive strength improved proportionally with the increase of the demoulded density of lightweight concrete which using pumice breccia as the coarse aggregate. Concrete mixes which are acceptable to be classified as structural lightweight concrete based on the minimum limit of compressive strength which is required in the Indonesian national standard and most of the International standards can be achieved when the lightweight concrete mixtures utilized pumice breccia as coarse aggregate with the volume fraction in between 55% to 75% to the total volume of coarse and fine aggregate.



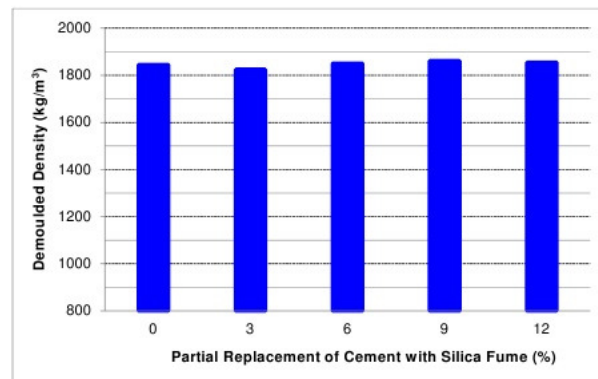
**Figure 4:** Correlation between Demoulded Density and Compressive Strength of Lightweight Concrete using Pumice Breccia as Coarse Aggregate



**Figure 5:** Effect of Silica Fume as Partial Replacement of Portland Cement on the Compressive Strength of Lightweight Concrete using Pumice Breccia as Coarse Aggregate

Effect of silica fume which was used as partial replacement of the portland cement on the compressive strength of hardened lightweight concrete using pumice breccia as coarse aggregate can be observed in Figure 5. The compressive strength tends to increase in accordance with the partial replacement of portland cement with silica fume up to 9% by weight of cement, but then tends to decrease after 12% of portland cement replaced with silica fume. Test results indicate that the optimum compressive strength can be achieved when the portland cement partially replaced with silica fume in a dosage of 9% by weight of cement. The compressive strength of lightweight concrete that utilized pumice breccia as coarse aggregate can be improved due to the partial replacement of portland cement with silica fume will produce chemical reaction between silica fume with the free-lime which resulted from the cement hydration. The reaction between silica fume and free-lime will produce calcium-silicate-hydrate that leads to pore-size refinement and matrix densification, and cement paste-aggregate interfacial refinement.

The demoulded density of lightweight concrete tends to increase in accordance with the improvement of compressive strength which was affected by silica fume that utilized as partial replacement of portland cement in the concrete mixes. The demoulded density increased caused by pore-size refinement and matrix densification in the hardened concrete. Even though the demoulded density of LWC with pumice breccia aggregate increasing due to the partial substitution of portland cement with silica fume, it can be observed that the density of the lightweight concretes are still acceptable to be classified as lightweight concrete based on the maximum limit of lightweight concrete density which is required in the Indonesian national standard and most of the International standards as shown in Figure 6.



**Figure 6:** Effect of Silica Fume as Partial Replacement of Portland Cement on the Demoulded Density of Lightweight Concrete using Pumice Breccia as Coarse Aggregate

## 5.0 Conclusions

Based on the tests results of the hardened properties of lightweight pumice breccia aggregate concrete, the following conclusions can be drawn:

- (1) The demoulded density of lightweight concrete tends to decrease, inversely proportional to the addition of the volume fraction of pumice aggregate into the mixes.
- (2) Structural lightweight concrete can be produced when the lightweight concrete mixtures utilizing pumice breccia as coarse aggregate with the volume fraction in between 55% to 75% to the total volume of coarse and fine aggregate.
- (3) The compressive strength of structural lightweight concrete can be improved proportionally up to 13.07% when the portland cement partially replaced with silica fume up to 9% by weight of cement.

## Acknowledgement

The authors highly appreciate the financial support from Universitas Negeri Yogyakarta (Yogyakarta State University), and the Directorate General of Higher Education, Ministry of Education and Culture. The support of the Building Material Laboratory staffs at the Faculty of Engineering, Universitas Negeri Yogyakarta for their assistance in conducting the experimental works are also gratefully acknowledged.

## References

- [1] EuroLightCon, "Definitions and International Consensus Report," European Union–Brite EuRam III, 1998, <http://www.sintef.no/static/BM/projects/EuroLightCon/BE3942R01.pdf>.
- [2] Badan Standarisasi Nasional, "SNI: 03-2847-2002: Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung", BSN, 2002. (In Indonesian).
- [3] S.M.F. Green, N.J. Brooke, L.G. McSaveney, and J.M. Ingham, "Mixture Design Development and Performance Verification of Structural Lightweight Pumice Aggregate Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 8, pp. 1211-1219, 2011.
- [4] N. Kabay, and F. Akoz, "Effect of Prewetting Methods on Some Fresh and Hardened Properties of Concrete with Pumice Aggregate," *Cement & Concrete Composites*, doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.11.022, 2011.
- [5] L. Xiaopeng, "Structural Lightweight with Pumice Aggregate," Master Thesis, National University of Singapore, 2005.
- [6] ACI Committee 213, "ACI 213R-03: Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete," American Concrete Institute, 2003.
- [7] S. Bronto, S. Mulyaningsih, G. Hartono, and B. Astuti, "Waduk Parangjoho dan Songputri: Alternatif Sumber Erupsi Formasi Semilir di daerah Eromoko, Kabupaten Wonogiri, Jawa Tengah," *Jurnal Geologi Indonesia*, Vol. 4 No. 2, pp. 79-92, 2009. (In Indonesian).
- [8] Pusat Pembinaan Sumber Daya Investasi, "Sistem informasi Sumber Daya Investasi: Potensi Material Konstruksi Propinsi DI Yogyakarta," Kementerian Pekerjaan Umum, [http://www.pusbinsdi.net/main.php?page=potensi\\_material&type=&op=detail&id\\_prop=12](http://www.pusbinsdi.net/main.php?page=potensi_material&type=&op=detail&id_prop=12), accessed: September 14, 2013. (In Indonesian).
- [9] P.K. Mehta, and P.J.M. Monteiro, "Concrete Microstructures, Properties, and Materials," McGraw-Hill, 2006.
- [10] R. Siddique, "Utilization of Silica Fume in Concrete: Review of Hardened Properties," *Resources, Conservation and Recycling* 55, pp. 923– 932, 2011.
- [11] BCA Academy, "Design Guide of High Strength Concrete to Singapore Standard CP 65," Building and Construction Authority, 2008.
- [12] British Standard, Concrete - Complementary British Standard to BS EN 206-1-Part 1: Method of Specifying and Guidance for the Specifier, BS 8500-1:2006, BSI, 2006.
- [13] ASTM C-143, C-469, C-496, and C-293, "Annual Book of ASTM Standard, Volume 04.02: Concrete and Aggregates", ASTM International, West Conshohocken, Pa, USA, <http://www.astm.org/>.